

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Kaspars BONDARS

**MŪRA PĀRSEGUMA
KONSTRUKCIJU ILGIZTURĪBAS
PROGNOZĒŠANAS METODIKA**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2011

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības fakultāte

Materiālu un konstrukciju institūts

Kaspars BONDARS

Būvniecības doktora programmas students

**MŪRA PĀRSEGUMA
KONSTRUKCIJU ILGIZTURĪBAS
PROGNOZĒŠANAS METODIKA**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. sc. ing., profesors
A.KORJAKINS

**RTU Izdevniecība
Rīga 2011**

UDK 624.012(043.2)
Bo 450 m

Bondars K. Mūra pārseguma
konstrukciju ilgizturības
prognozēšanas metodika. Promocijas
darba kopsavilkums. – R.: RTU,
2011.- 42 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Promocijas
padomes P-06, 2011. gada 24. februāra
lēmumu, protokols Nr. 3-2011.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.

ISBN 978-9934-10-147-2

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ
INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI**

**Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts
2011. gada 1. jūlijā, Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības fakultātē, Āzenes ielā
16/20, 204. auditorijā.**

OFICIĀLIE OPONENTI

Profesors, Dr. sc. ing. Ainārs Paeglītis, Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors, Dr. sc. ing. Ārijs Videvuds Lapsa, Rīgas Tehniskā universitāte

Asoc. profesore, Dr. sc. ing. Lina Seduikyte, prodekāne, Kauņas Tehnoloģijas universitāte,
Civilās būvniecības un Arhitektūras fakultāte

APSTIPRINĀJUMS

**Es apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts
izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai.
Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē, zinātniskā grāda iegūšanai.**

Kaspars Bondars

Datums

**Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, literatūras apskatu (1
nodaļu), pētniecisko daļu (1 nodaļu), secinājumus un izmantotās literatūras sarakstu.
Saturs izklāstīts uz 141 lappusēm. Darbs satur 70 attēlus, 6 tabulas un izmantotās
literatūras sarakstu, kas ietver 153 literatūras avotus.**

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte:

Vairākus gadu tūkstošus mūra tehnoloģija bijusi dominējošā būvniecības tehnoloģija, kura īpaši attīstījās viduslaiku sakrālās būvniecības laikā. Līdz 19.gs mūra pārsegumi bija dominējošā pārsegumu tehnoloģija liellaidumu pārsegumos. No 9.gs līdz 19.gs mūra tehnoloģija bija dominējošā sakrālo būvju celtniecības tehnoloģija Baltijas jūras reģionā.

Vēsturisko celtnju būvkonstrukciju stāvoklis pasliktinās ārējo faktoru un ekspluatācijas slogojuma dēļ. Mūra ēku pamatu konstrukciju degradācija un balstu nevienmērīgas deformācijas novedušas pie vēsturisku ēku mūra konstrukciju plaisāšanas un ekspluatācijas pasliktināšanos. Ēku pamatu nevienmērīgā noslodze un balstu deformāciju nevienmērība izraisa spriegumstāvokļa izmaiņas mūra masīvā, izsaucot lokālu sabrukumu. Mūra velvju ekspluatācijas drošības samazināšanās ir mūra masīvu deformāciju sekas. Pārmērīgas balstu deformācijas draud ar mūra velvju noturības zudumu un tam sekojošu progresīvu sabrukumu.

Latvijas Valsts Kultūras Pieminekļu Aizsardzības inspekcijas reģistrā atrodamas 263 baznīcas, liela daļa, no kurām būvētas masīvu mūru konstrukcijās. Papildus baznīcām un katedrālēm kā analizējamus objektus var minēt klosterus, rātsnamus, nocietinājuma sienas, pilis un citas ēkas ar mūra velvju pārsegumiem.

Rīgas vēsturiskajā centrā atrodas Doma baznīca, Jura baznīca, Jēkaba baznīca, Pētera baznīca, kuru pārsegumi veidoti mūra velvju konstrukcijās. Arī cituviet Latvijā būvētas monumentālas baznīcas gotiskajā arhitektūras stilā, piemēram, sv. Sīmaņa baznīca Cēsīs un Ikšķiles baznīca. Līdzīgi Rīgas vēsturiskajam centram, tādu pilsētu vēsturiskie centri, tādi kā Ventspils, Ķīle, Hamburga, Lībeka, Ščecina, Gdaņska, Rostoka, Roterdama un Amsterdamā arī atrodas uz pamatnes no upes gultnes sanesumiem. Šo vecpilsētās vēsturisko ēku analīzei var izmantot šajā darbā izstrādāto metodoloģiju. UNESCO pasaules kultūras mantojuma sarakstā ir 55 baznīcas, no kurām 7 ir koka konstrukcijās, bet 48 ir romānisma vai gotiskajā arhitektūras stilā būvētas mūra baznīcas. UNESCO pasaules kultūras mantojuma sarakstā iekļauti pilsētu vēsturiskie centri: Tallinas vecpilsēta Igaunijā, Rīgas vecpilsēta Latvijā, Kveldinburgas un Regensburgas vecpilsētas Vācijā, Korfu vecpilsēta Grieķijā un Avilas, Caceres, Segovijas un Santiago de Compostela vecpilsētas Spānijā.

Lai analizētu esošus mūra pārsegumus, nepieciešams izstrādāt metodi automatizētai mūra velvju uzmērījumu veikšanai un datoranalīzei, kā arī izstrādāt metodoloģiju vēsturisku mūra velvju pārseguma drošības analīzei.

Darba mērķi un uzdevumi:

- a) Izveidot metodoloģiju mūra velvju uzmērījumu veikšanai un datoranalīzei:
 - a. aprobēt lāzera skanēšanas metodi mūra velvju uzmērījumu veikšanas automatizācijai;
 - b. novērtēt datu apstrādes algoritmus, lai efektīvi transformētu mūra ēku virsmu lāzera skanējuma datus, digitāla virsmu modeļa iegūšanai;
 - c. aprobēt iegūto virsmu transformācijas ceļus būvkonstrukciju datoraprēķina programmām;
 - d. izvēlēties mūra materiālu testa metodes materiālu īpašību noteikšanai;
 - e. definēt mūra materiālu īpašības būvkonstrukciju datoraprēķiniem.
- b) Izstrādāt metodoloģiju, lai analizētu vēsturisku mūra velvju pārsegumu drošību:
 - a. analizēt esošas ēkas mūru pārsegumu datoraprēķina programmā, modelējot to nestspējas robežstāvokli;
 - b. izvērtēt mūra velvju balstu deformāciju ietekmi uz velvju noturību un ekspluatācijas drošību;
 - c. veikt piedāvātā aprēķina modeļa validāciju ar Rīgas Doma baznīcas plaisu monitoringa datiem, analizējot mūra materiālu un ekspluatācijas slogojumu;
 - d. analizēt mūra velvju esošo deformēto stāvokli, salīdzinot to ar deformāciju monitoringa datiem;
 - e. veikt vēsturisku mūra pārseguma konstrukciju nestspējas un noturības modelēšanu ar būvkonstrukciju aprēķina programmām.

Aizstāvēšanai tiek izvirzīts:

- a) Inversās inženierijas metodes piemērošana esošu mūra pārseguma būvkonstrukciju analīzei;
- b) Drošas ekspluatācijas robežas prognozes metode, analizējot velvju pārseguma plaisu monitoringa datus.

Darba zinātniskā novitāte:

Promocijas darbā izstrādātā metodoloģija dod iespēju veikt mūra konstrukciju analīzi un plānot rekonstrukcijas darbus esošo ēku saglabāšanai. Metodoloģija ļauj ievērtēt esošu mūra

ēku ekspluatācijas apstākļus un modelēt mūra pārsegumu ekspluatācijas drošumu. Metodoloģija aprobēta Rīgas Doma baznīcā un paver iespējas citu vēsturisko ēku analīzei. Rīgas mērogā šī metodika var tikt izmantota viena desmita, Latvijas mērogā viena simta, bet Eiropas mērogā vairāku tūkstošu, vēsturisku mūra celtnu būvkonstrukciju stāvokļa analīzei.

Promocijas darba ietvaros pirmo reizi tiek analizēti velvju pārsegumi telpiskā modelī, pielietojot augstas precizitātes virsmas ģeometriju. Darbā izmantoti būvzinātnes sasniegumi un Latvijas būvkonstrukciju projektēšanas praksē, plaši lietota datoraprēķinu programmatūra, kas ļauj ievērtēt mūra ekspluatācijas apstākļus un modelēt esošu ēku konstrukciju darbību. Ārējās iedarbes, ekspluatācijas ietekme un mūra materiālu ilglaicīgie efekti pasliktina ēku būvkonstrukciju stāvokli un rada ekspluatācijas drošības samazinājumu.

Lai gan Latvijā un pasaulē liela vērība tiek pievērsta vēsturisku mūra ēku izpētei un modelēšanai, tomēr, lai sniegtu pilnīgu analīzi un plānotu rekonstrukcijas darbus, nepieciešams komplekss risinājums, kāds tiek piedāvāts šajā darbā.

Šajā promocijas darbā trīsdimensiju lāzerskanēšanas tehnoloģija izmantota, lai no digitalizēta virsmas punktu mākoņa iegūtu mūra pārseguma datoraprēķina modeli. Pasaules praksē ir plaši izplatīta inversā inženierija (*reverse engineering*), taču tā netiek pielietota mūra konstrukcijas būvju analīzē. Ģeometrisku modeļu izveide no lāzerskanējuma datiem tiek pielietota mašīnbūvē, stomatoloģijā un dažādu izstrādājumu virsmu digitalizācijā. Lāzera skanējuma virsmas uzmērīšanas precizitāte dod iespēju veikt liektu ēku un būvju virsmu uzmērīšanu desmit reižu precīzāk, salīdzinot ar telpiski liektu virsmu optisko uzmērīšanu. Latvijas apstākļos vēsturiskās mūra ēkas, tilti un velves skanētas, lai iegūtu digitalizētu virsmas modeli rekonstrukcijas vai stāvokļa fiksācijas nolūkos.

Mūra pārseguma deformēto stāvokli, modelējot elastīgajā materiāla stadijā, nevar ievērtēt nevienmērīgu balstu deformāciju efektus, tādēļ izstrādātas materiālu īpašību noteikšanas metodes nelineāriem aprēķiniem.

Pasaules praksē mūra materiālu īpašību modelēšana ir plaši pētīta, tādējādi paverot iespēju aprakstīt mūra materiāla īpašības gan ar diskretizācijas [skatīt 3.1.4. nodaļu], gan ar materiāla homogenizācijas paņēmieni [skatīt 3.1.5. nodaļu]. Literatūrā plaši aprakstīti mūra defekti un to ietekme uz mūra materiālu fizikālajām īpašībām. Mūra konstrukcijas modelētas, pielietojot materiāla homogenizācijas metodi, ievērtējot ilglaicīga slogojuma plasticitātes efektu. Metodes papildus iespējas ir analizēt vēsturiskas mūra ēkas būvniecības etapu un

ekspluatācijas laikā veikto pārbūvju ietekmes izvērtēšanu uz spriegumstāvokli mūra masīvos un pārsegumos.

Šī darba ietvaros pētīta Rīgas Doma baznīcas būvniecība pa vēsturiskajiem etapiem, lai pēc iespējas precīzāk analizētu mūra daļu darbību esošajā deformētajā stāvoklī.

Lai nodrošinātu plaisu pārvietojumu mērījumus, Rīgas Doma baznīcā, izstrādāta plaisu automātiskā monitoringa programma, kura reālajā laika režīmā ļauj izvērtēt deformāciju attīstības tendences un pievērst uzmanību zonām ar augstāku deformāciju dinamiku. Metode ļauj precizēt esošo monitoringa programmu, analizēt iegūtos rezultātus, kā arī pamatot papildus izpētes nepieciešamību.

Darba praktiskais pielietojums:

Metodoloģija paver iespējas uzmērīt, modelēt, plānot bojājumu monitoringu, plānot rekonstrukciju un izvērtēt esošu ēku ekspluatācijas drošību.

Lāzerskanēšanas datu izmantošana ģeometrisko modeļu definēšanā ļauj paaugstināt modeļa precizitāti un ietaupa cilvēku resursus, kā arī izslēdz datu interpretācijas un apstrādes kļūdas. Līdzšinējā prakse velvju ģeometrisko modeļu izveidē ir ģeometrisku proporciju interpretācija, veicot optiskus mērījumus plāna koordināšu tīklā.

Metodika ļauj sagatavot objekta ģeometriskos datus rekonstrukcijai. Analizēt patreizējo spriegumstāvokli konstrukcijā, modelēt rekonstrukcijas efektus un izvērtēt rekonstrukcijas efektivitāti.

Rīgas Doma baznīcas pārseguma un vertikālo konstrukciju deformētā stāvokļa analīze veikta pielietojot reāli konstatētos ekspluatācijas apstākļus un slogojumu. Konstrukciju analīzē ievērtētas pamatu nevienmērīgās deformācijas, temperatūras izmaiņas, to sadalījums konstrukciju šķēsgriezumā un mitruma izmaiņu ietekme uz mūra materiāliem.

Metodes turpmāka attīstība:

- a) rezultātu analīze, precizējot monitoringa programmu un mūra materiālu papildus izpētes nepieciešamību;
- b) rekonstrukcijas datormodelēšana un iegūto pastiprinājuma efektu izvērtēšanas, sniedzot rekomendācijas rekonstrukcijas projekta izstrādei;
- c) ekspluatācijas apstākļu izmaiņu simulācija datoranalīzes programmā, ar mērķi izvērtēt avārijas slogojuma efektus un citas ekspluatācijas apstākļu izmaiņas.

Darba aprobācija un publikācijas

Datoraprēķina modeļa validācijai tiek izmantoti Rīgas Doma plaisu atvēruma monitoringa dati. Rīgas Doma baznīcā uzstādīta plaisu monitoringa sistēma secīgi veic plaisu mērījumus 22 punktos. Plaisu dinamikas novērtēšanai tiek veikti plaisu atvēruma mērījumi automātiskā režīmā ar divu stundu intervālu. Analizējot Rīgas Doma baznīcas mūra pārseguma slogojumu un plaisu pārvietojumus tiek prognozēta ēkas pārseguma ekspluatācijas drošība. Pamatojoties uz uzkrātajiem monitoringa datiem aprobēts datoraprēķina modelis un analizēts slogojums. Materiālu īpašības datoraprēķina modelī pieņemtas no veiktajiem materiālu testiem. Datorsimulācijā ievērtēts mūra pārseguma slogojums un tā efekti.

Kā izejas dati izmantoti:

- a) būvniecības gaitas vēsturiskā izpēte izmantojot VKPAI arhīvus,
- b) konstruktīvo elementu būvniecības tehnoloģiju vēsturiskā izpēte [1];
- c) rekonstrukciju ieviesto konstruktīvo izmaiņu izvērtējums;
- d) konstruktīvo elementu tehniskā stāvokļa izpēte [2];
- e) konstrukciju būvmateriālu laboratoriskā izpēte [2];
- f) mūrjavu ķīmiskā analīze [3];
- g) ēkas mikroklimata monitoringa dati [4];
- h) konstruktīvo elementu ģeometrijas lāzerskanējums [5; 6];
- i) konstruktīvo defektu fiksācija un uzmērījumi [7; 8];
- j) pamatu balsta apstākļu, pamatu izpēte [8; 9; 10];
- k) inženierģeoloģiskā izpēte [9; 10];
- l) gruntsūdens svārstību monitoringa dati [11];
- m) gruntsūdens mikrobioloģiskā izpēte [12];
- n) konstrukciju slogojuma pētījums;
- o) konstrukciju radara zondēšanas dati [8];
- p) sēšanās monitoringa dati [13];
- q) plaisu atvēruma monitoringa dati [14].

Analizējot visus apkopotos testus un izpētes, modelēts ēkas pārseguma deformētais stāvoklis un analizēta tā ekspluatācijas drošība. Izpētes un monitoringa analīze salīdzināta ar esošā pārseguma bojājumiem un to dinamiku. Pētījuma starprezultāti prezentēti sekojošās zinātniskajās konferencēs, rakstus publicējot zinātnisko rakstu krājumos:

- a) Bondars K., Korjamins A., Improved deformation mechanism of masonry vault // Mechanics of masonry structures strengthened with composite materials Università IUAV di Venezia. 2009. gada 22.-24. aprīlis. Itālija, Venēcija. - Konferences rakstu krājums, 23.-23. lpp.
- b) Korjamins A., Bondars K., Definition the safe exploitation limits of Dome cathedral by monitoring of support deformation and existing cracks // „Hayka и инновации в строительстве SIB 2008”, 2008. gada 10.-15. novembris, Krievija, Voroneža. – Konferences rakstu krājums, 177.-182. lpp.
- c) Bondars K., Korjamins A., Mūra velvju stabilitātes novērtēšanas monitoringa kritēriju izstrāde // 49. RTU Zinātniskā konference, 2008. gads, Latvija, Rīga. - RTU zinātniskie raksti. 2. sēr., Būvzinātne. - 9. sēj. (2008), 25.-36. lpp.
- d) Bondars K., Korjamins A., Safety criteria development on groined masonry arch stability initiated by structure support deformations // 4th International Specialty Conference on The conceptual approach to structural design. Dept of Architecture & Construction, Università IUAV di Venezia. 2007. gada 27.-29. jūnijs. Itālija, Venēcija. - Konferences rakstu krājums CD, 12. lpp.
- e) Bondars K., Korjamins A., Influence of deformation at a heritage building support on stability of groined masonry arch // “Computational Civil Engineering 2007”, 5th International Symposium, 2007. gada 25. maijs, Rumānija, Iași. – Konferences rakstu krājums, 39.-54. lpp.
- f) Bondars K., Korjamins A. Modelling of structural masonry groined arch // Starptautiskā būvniecības konference “Būvniecība ‘05”. 2005. gada 26. maijs, Latvija, Jelgava, - Konferences rakstu krājums, 21.-26. lpp.

Promocijas darba rezultāti ziņoti starptautiskās zinātniskajās konferencēs:

- a) Korjamins A., Bondars K., Definition the safe exploitation limits of groin vault in heritage masonry structures // International conference on civil engineering design and construction ”Eurocodes - science and practice”, 2010. gada 9.-11. septembris. Bulgārija, Varna. - Konferences rakstu krājums, 327.-332. lpp.
- b) Bondars K., Korjamins A., Elaboration the model of heritage groined masonry arch for definition the safe exploitation limits // 10. starptautiskā konference, „Modern building materials, structures and techniques”, 2010. gada 19.-21. maijs. Lietuva, Viļņa. - Konferences rakstu krājums, 868.-873. lpp.

IZSTRĀDĀTĀS METODOLOĢIJAS APKOPOJUMS

Darba metodika ietver mūra ēku drošības novērtēšanas metožu kompleksu, kura ietvaros tiek pētītas mūru materiālu īpašības un to iegūšanas metodes, lai definētu vēsturisko mūru materiālu fizikālās īpašības datoraprēķina modelim.

Darba ietvaros aprobēta lāzerskanējuma izmantošana liektu mūra pārsegumu ģeometriskā modeļa izveidei un datu transformācijai vairākās plaši izmantotās būvkonstrukciju analīzes datorprogrammās. Izmantojot plaisu monitoringa sistēmas plaisu pārvietojuma datus, veikta velvju pārseguma balstu deformāciju analīze.

Pētot plaisu attīstību balstu deformāciju ietekmē modelēta velvju pārsegumu noturības robeža un definēts pārseguma drošas ekspluatācijas kritērijs. Prognozēti drošas ekspluatācijas termiņi kalibrējot pārseguma balstu deformāciju, temperatūras slogojuma, ekspluatācijas slogojuma un materiālu degradācijas efektus ar plaisu monitoringa datiem.

Metodikas apraksts:

Piedāvātā un darbā aprobētā vēsturisko mūra ēku apsekošanas, uzmērīšanas, analīzes un drošas ekspluatācijas prognozes metodoloģija sastāv no:

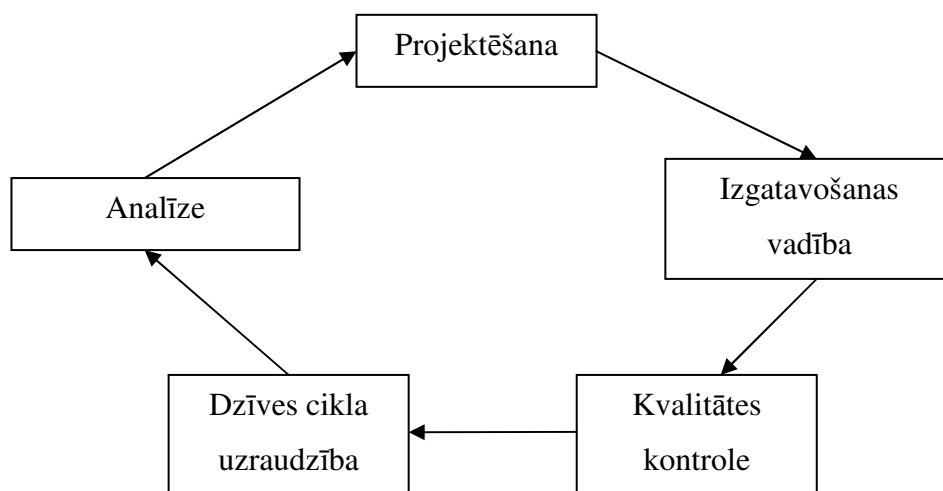
- a) apsekojamās ēkas bojājumu vizuālas apskates, lai noteiktu bojājumu apjomu un raksturu;
- b) bojājumu monitoringa shēmas izstrādes, lai kontrolētu deformāciju attīstību,
- c) konstrukciju virsmu lāzerskanēšanas, iegūstot mūra virsmu aprakstošas punktu kopas;
- d) telpiskas virsmas modelēšanas, iegūstot ēkas konstrukcijas virsmu digitalizētu modeli un attīrot skanējuma datus no konstruktīvajām virsmām neatbilstošiem datiem;
- e) skanējuma datu apstrādes, pārveidošanas un transformācijas virsmas vai telpiskā modelī, pēc iespējas saglabājot virsmu ģeometrisko precizitāti un sagatavojot datormodeli ēkas analīzes mērķim atbilstošā kvalitātē;
- f) efektīvākās metodes izvēli mūra materiālu īpašību noteikšanai, ievērojot ēkas analīzes specifisko mērķu prasības;
- g) mūra materiālu testu apjoma izvēles, lai iegūtu nepieciešamos mūra parametrus materiālu īpašību definēšanai datoranalīzē;
- h) iespējamās informācijas ieguves par ēkas pārbūvi vai izmaiņām būvniecības procesā, ar mērķi koriģēt datoraprēķina modeli;
- i) ekspluatācijas apstākļu apkopošanas, lai nodefinētu iedarbes datoranalīzes modeli;

- j) ēkas telpiskas darbības modelēšanas, ievērtējot mūra materiāla ilglaicīgos deformāciju efektus;
- k) ekspluatācijas apstākļu piemērošanas analīzei, ar mērķi sasniegt monitoringa datiem atbilstošu datormodeļa uzvedību;
- l) rezultātu analīzes, precizējot monitoringa programmu un mūra materiālu papildus izpētes nepieciešamību;
- m) rekonstrukcijas datormodelēšanas un iegūto efektu izvērtēšanas, dodot rekomendācijas rekonstrukcijas projekta izstrādei;
- n) ekspluatācijas apstākļu izmaiņu simulācijas datoranalīzes programmā, ar mērķi izvērtēt ekspluatācijas slogojuma izmaiņu efektus.

Promocijas darbā piedāvātā metodoloģija ļauj samazināt velvju pārsegumu analīzes darbietilpību, ievērtēt būvdarbu etapu un rekonstrukciju ietekmi, veikt padziļinātu ēkas izpēti ekspluatācijas apstākļu un rekonstrukcijas plānošanas gadījumam.

2. NODAĻA - INVERSĀS INŽENIERIJAS PIELIETOŠANA BŪVKONSTRUKCIJU ANALĪZĒ

Promocijas darba ietvaros aprobēta inversās inženierijas pielietošana esošu ēku konstrukciju analīzē. Inversā inženierija plaši pielietota rūpniecībā nodrošinot pilnu detaļu izstrādes un uzlabošanas ciklu, nodrošinot ekspluatācijas izmaiņu atgriezenisko saiti no dzīves cikla uzraudzības, sk. 1. attēlu. Detaļu izstrādē plaši lietotā automatizētā sistēma CAD/CAE/CAM/PLM ietver detaļas projektēšanu – CAD (*Computer Aided Design*), detaļu datoraprēķinus – CAE (*Computer Aided Engineering*), detaļu datorizētu izgatavošanas vadību – CAM (*Computer Aided Manufacturing*) un detaļu precizgatavošanas un īpašību izmaiņu ilgstošu kontroli ar mērķi uzlabot izstrādājumi – PLM (*Product Lifecycle Management*).



Att. 1. Mašīnbūves detaļu inversā inženierija nodrošina analīzes atgriezenisko saiti.

Inversās inženierijas aprobācija būvkonstrukciju analīzei tiek nodrošināta ar secīgi sakārtotiem etapiem:

- a) būvkonstrukciju virsmas digitalizācija – 3D lāzerskanēšana;
- b) virsmas skanējuma datu apstrāde, attīrīšana un labošana;
- c) tīkla modeļa izveide;
- d) modeļa transformācija būvkonstrukciju datoraprēķina programmās;
- e) materiāla definēšana, testējot mūra materiālus;
- f) konstrukcijas analīze;
- g) aprēķina modeļa un reālās konstrukcijas deformētā stāvokļa un bojājumu dislokācijas analīze;

- h) konstrukcijas bojājumu attīstības prognoze, analizējot bojājumu attīstības monitoringa datus;
- i) rekonstrukcijas analīze un iegūto uzlabojumu analīze;
- j) pēcrekonstrukcijas konstruktīvo izmaiņu uzraudzība un analīze.

Būvkonstrukciju inversās inženierijas noslēguma etapi atšķiras no mašīnbūves etapiem, būtiskā atšķirīgā pazīme ir iespēja atkārtoti izgatavot mašīnbūves detaļu ar jau uzlabotām īpašībām, turpretī esošo būvkonstrukciju īpašības iespējams uzlabot tikai rekonstrukcijas ceļā.

Promocijas darbā, izvērtējot inversās inženierijas īpatnības, noteiktas atšķirīgās iezīmes vēsturisko mūra konstrukciju analīzē:

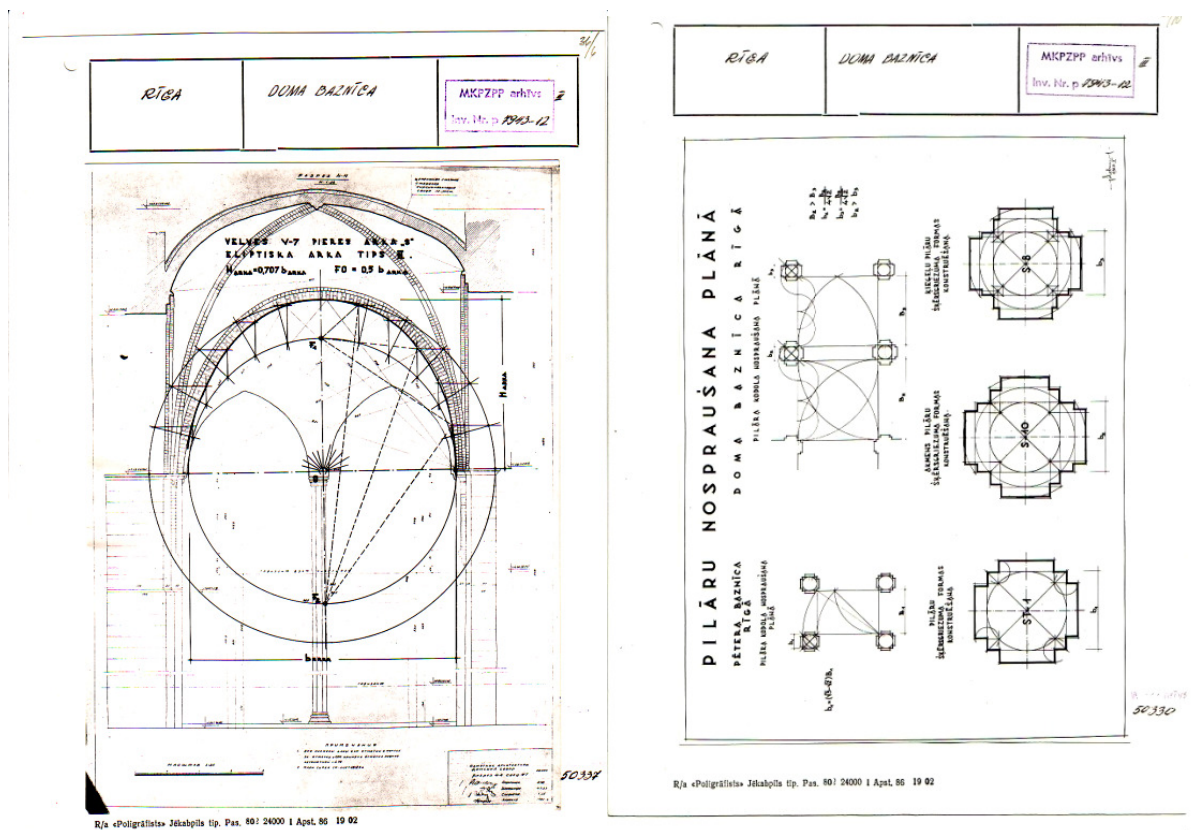
- a) liela apjoma datu savietošana no vairākām skanēšanas stacijām;
- b) plakņu dublēšanās no blakus punktu kopām;
- c) uzmērījuma datu trūkums, veidojot skanera tiešajai redzamībai slēptas plaknes;
- d) skaneru stacijas novietojums grīdas līmenī;
- e) manuāla modeļa korekcijas nepieciešamība, dzēšot apdares slāņus un interjera elementus;
- f) manuāla modeļa korekcija, modelējot slēptās plaknes;
- g) būvkonstrukciju analīzes programmu datu importa formātu neatbilstība;
- h) būvkonstrukciju datoranalīzes programmu modeļa izmēra lieluma ierobežojumi pilna modeļa analīzei;
- i) lielāks skanējuma tīkla dalījums un zemākas prasības precizitātei;
- j) deformētās formas atkārtotas ģeometriskās inspekcijas automātiska analīzes iespēja;
- k) nav zināmas materiālu īpašības un to izmaiņas ekspluatācijas laikā;
- l) materiāla neviendabība un īpašību izkliede;
- m) konstruktīvo materiālu iekšējie defekti.

Līdzšinējā prakse ģeometrijas ieguvei esošu būvkonstrukciju analīzē raksturojama, kā darbietilpīga uzmērījumu veikšana, pielietojot optiskos instrumentus.

Virsmu ģeometriskā modelēšana

Velvju uzmērījumi Rīgas Doma baznīcā, sk. 2. attēlu, analītisku aprēķinu nolūkā, 1959. gadā parāda lielu pielietoto proporciju dažādību, izdalot 8 smailu arku proporciju tipus un četrus velvju proporciju tipus. Proporciju meklējumi noveda strupceļā, jo tika konstatēts liels

skaits dažādu ģeometrisku proporciju un velvju ģeometrijas atšķirīga līmeņu piesaiste. Izmantojot šos datus analītiskā aprēķinā vai ģeometriski formējot galīgo elementu modeli būtu bijis jāievieš vienota proporciju sistēma, kas radītu ģeometriskā modeļa kļūdu. Ģeometriskās kļūdas ietekme uz analītiskā aprēķina rezultātiem pilnībā izslēgtu aprēķina atbilstību reālās ēkas darbības modelim.



Att. 2. Ģeometriskās formas meklējumi velvju proporcijām.

Augstākas precizitātes ģeometriskā uzmērīšana un modelēšana saistīta ar liela skaita velvju tipu analīzi un savstarpējās ietekmes izvērtēšanu.

Promocijas darba ietvaros lāzerskanējuma dati izmantoti virsmu ģenerēšanai, ar mērķi veidot reālajam objektam pēc iespējas tuvu digitālu modeli. Lāzerskanējuma transformācijas konstrukciju datoraprēķinu modelī ir inovatīvs risinājums būvkonstrukciju analīzē. Datormodeļa izveidē pielietoti mūra virsmu uzmērījumu dati no Kaļiņkas pētījuma [5], virsmu dokumentācijas datus transformējot būvkonstrukciju datoraprēķinu modelī.

Lāzerskanējumā rezultātā iegūtais telpiskais ēkas modelis var kalpot gan prezentāciju mērķiem, gan konstrukciju analīzes mērķiem, gan rekonstrukcijas plānošanas mērķiem, gan vēsturisko elementu telpiskas dokumentēšanas mērķiem [6].

Kaļinka [15] izvirzījis lāzerskanera pielietošanas priekšrocības, salīdzinot ar optiskās uzmērīšanas metodi:

- a) laiktelpības samazinājums veicot līdzīga apjoma uzmērījumus (70 - 80%);
- b) augsta precizitāte ar regulācijas iespējām (~2mm uz 50m attālumu);
- c) regulējama leņķiskā mērījumu tīkla iestādīšana uz skanējamās virsmas sasniedzot nepieciešamo mērījuma tīkla izmēru (20x20mm);
- d) cilvēka kļūdas izslēgšana pie mērījumu interpretācijas;
- e) telpiskas ģeometrijas modeļa iegūšana konvertējot datus starp datorprogrammām.

Apstrādājot šos punktus veidots virsmas modelis, kurš būvkonstrukciju datoraprēķinu programmām sagatavots kā virsmas tīkla modelis. Pētījums parāda, ka lielākā apstrādes darbietilpība saistīta ar slēpto plakņu formēšanu, un interjera elementu un apdares slāņu dzēšanu.

Modeļu transformācija konstrukciju datoraprēķinu paketēm

Promocijas darba ietvaros veikta ģeometriskā modeļa izveide izmantojot virsmu trīsdimensiju lāzerskanēšanas datus, veicot to apstrādi un tādējādi nodrošinot grafisko datorprogrammu un būvkonstrukciju analīzes datorprogrammu sasaisti.

Lai vispārinātu promocijas darba ietvaros izstrādātās metodes pielietojamību ieviesti kritēriji, kuru ievērošana dotu iespējami plašu šīs metodoloģijas pielietojumu, nepiesaistot to konkrētu ražotāju lāzerskanēšanas iekārtām un datu datorapstrādes programmu iespējām.

Promocijas darba ietvaros izvirzīti datu transformācijas kritēriji:

- a) lai nodrošinātu plaša spektra trīsdimensionālo lāzerskaneru pielietošanu, datu transformācijas izejas formātam jāsaturs punktu koordinātu datus bez papildus informācijas par virsmas krāsu, tekstūru un tamlīdzīgi. Visu lāzerskaneru ražotāju atbalstīts formāts ir *.xyz;
- b) punktu kopu apstrādei nepieciešama specializēta datorprogramma, kuras ietvaros var:
 - a. dzēst punktus, kuri atrodas ārpus skanējuma plaknēm;
 - b. apvienot punktus vienotās plaknēs, mazinot punktu diverģenci pret plakni;
 - c. dzēst interjera un apdares slāņus raksturojošos punktus;

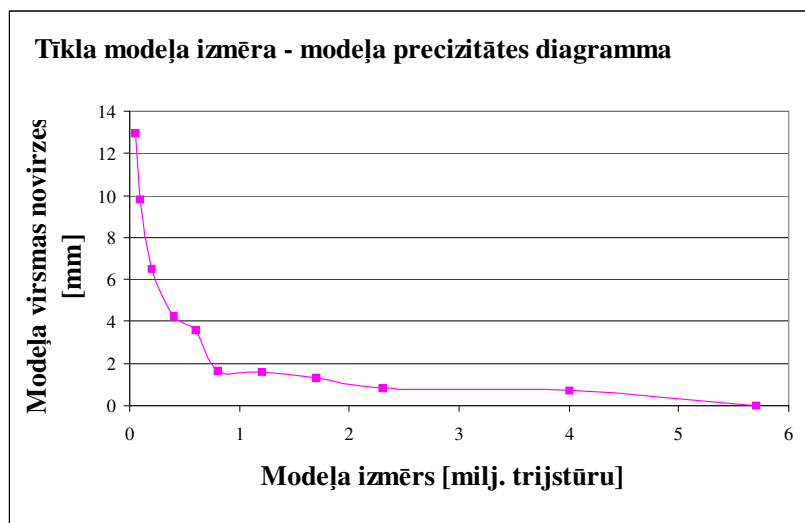
- d. aizvietot apšuvuma un interjera detaļu plaknes ar konstrukciju virsmu plaknēm;
 - e. apvienot atsevišķas plaknes vienotā virsmas elementā;
 - f. griezt plaknes pret aprēķina modeļa robežām vai simetrijas plaknēm;
 - g. transformēt virsmu uz režģa modeli;
 - h. samazināt virsmu raksturojošo plakņu elementu skaitu, nesamazinot virsmu precizitāti;
 - i. apstrādāt liela izmēra grafiskos failus;
 - j. nodrošināt plašu saikni ar būvkonstrukciju datoraprēķinu programmām, atbalstot galvenos datu transformācijas failu formātus.
- c) datu transformācijas formātam un datu saturam jāatbilst inženieraprēķinu praksē plaši lietotu būvkonstrukciju analīzes datoraprēķinu programmu importa iespējām;
- d) konstrukcijas modelim jānodrošina katras konkrētās būvkonstrukciju datoraprēķina programmas analīzes iespējas, nepārsniedzot importa elementu apjomu, pielāgojoties galīgo elementu tipiem un nodrošinot analīzes tipu (lineāri elastīgajās robežās, elastīgi plastiskajās robežās vai sabrukuma teorijas robežās);
- e) veicot konstrukciju analīzi jānodrošina, katram analīzes tipam nepieciešamo materiālu raksturlielumu noteikšanas iespēja;
- f) datorsimulācijai jānodrošina izvirzītā uzdevuma izpilde, piemēram: iekšējo spēku pārbaude, deformāciju pārbaude, sabrukuma drošības līmeņa pārbaude un tamlīdzīgi.

Galīgo elementu būvkonstrukciju datoraprēķinu programmas paketē tiek piedāvāts vairāk vai mazāk ērts preprocesors, ar kura palīdzību var nodrošināt aprēķina modeļa izveidi un grafisko datu apstrādi un atbalsta modeļa ģeometrijas importu vai parametriska modeļa importu.

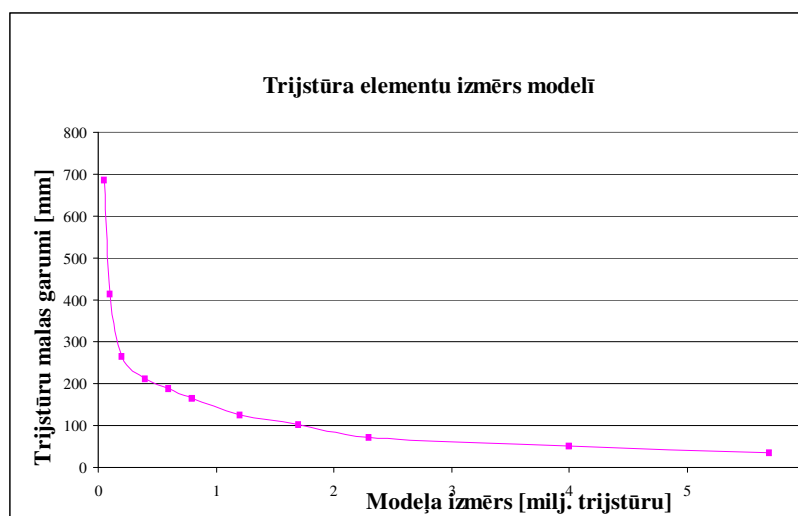
Promocijas darba tika salīdzināti datu transformācijas programmas, parādot transformācijas procesus, datu apjomu un procesam patērēto laiku. Tika izstrādāts un aprobēts datu transformācijas ceļš ar minimālu laika patēriņu un datorprogrammu savstarpēju savietojamību.

Kalibrējot virsmas novirzes un elementu skaitu izveidots Rīgas Doma baznīcas ēkas daļas modelis, kurš nodrošina velves stūra balsta nevienmērīgu deformāciju analīzi.

Izveidotais modelis kalibrēts ar virsmas precizitāti zem 13,4mm un tīkla modeļa izmēru 97000 trijstūra elementu. Ģeometriskā tīkla dalījuma izmēru pieaugums nosaka liektas virsmas modeļa precizitātes samazinājumu. Krusta velvės čaulas virsmas modeļa ģeometriskās precizitātes sasaisti ar modeļa precizitāti, sk. 3. attēlu.



Att. 3. Tīkla modeļa izmēra kalibrēšana mainot tīkla elementu.



Att. 4. Modeļa izmēra un precizitātes kalibrēšana mainot tīkla elementu.

Kalibrējot tīkla modeļa elementa izmērus analizēta tā ietekme uz modeļa izmēru, sk. 4. attēlu. Noteikts optimāls tīkla elementu malas izmērs, kas Rīgas Doma baznīcas velvju gadījumā ir 150 – 200mm.

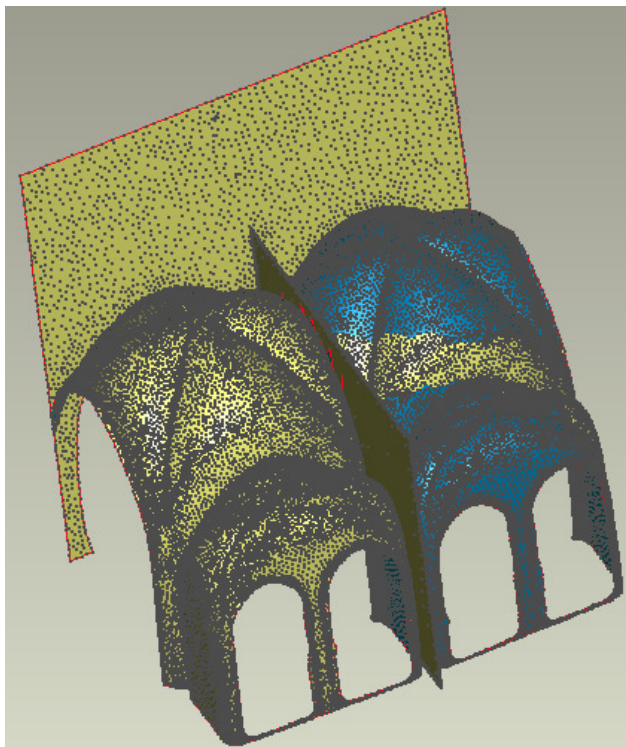
Veicot tīkla kalibrāciju iegūti balstu nevienmērīgas deformācijas analīzes modeļa elementa izmēri un tīkla modeļa izmēri. Promocijas darba inversās inženierijas metode aprobēta Latvijas apstākļos plaši lietotām būvkonstrukciju datoraprēķinu programmām, tādām

kā Staad Pro V8i un Sap 2000 v14.2. Komerčiālās būvkonstrukciju datoraprēķinu programmas nav piemērotas liela apjoma modeļu apstrādei, to limitējošie modeļu izmēri ir:

- a) 225000 plātņu elementu – Staad Pro V8i,
- b) 100000 plātņu elementu – Sap 2000 v14.2.

Modelēšanā pielietoti biezo plātņu elementi, izmantojot Mindlin - Reissner formulējumu. Plātņu elementu apraksts un pielietojamības iespēju apraksts sniegts promocijas darba 3.6 nodaļā.

Balsta deformācijas analīzei izstrādāts ēkas daļas virsmu modelis, sk. 5. attēlu.



Att. 5. Velves balsta deformācijas analīzes modelis, Rīgas Doma baznīcas sānu joma fragments.

Promocijas darbā analizēti efektīvākie datu apstrādes ceļi, datu transformāciju operācijas un darbietilpības, datu un failu formāti, kā arī apstrādes instrumenti apkopoti promocijas darba 2.2 tabulā.

Inversās inženierijas pārvešana uz esošu mūra konstrukciju analīzi saistīta ar informācijas trūkumu par materiālu īpašībām un to degradāciju ekspluatācijas laikā.

Mūra materiālu īpašību noteikšana

Mūra materiāla homogenizācijas pieeja plaši lietota mūra materiālu analīzē, ievērtējot šļūdes un rukuma ietekmi materiāla elastības rādītājos. Lai gan šo materiāla pieņēmumu un elastīgu aprēķina metodi izmanto vairums būvkonstrukciju projektētāju, netiek ievērtēta mūra

plasticitāte dažādos sprieguma līmeņos. Latvijas būvnormatīvs, mūra konstrukciju analītiskos aprēķinos pieļauj lineāri elastīgu mūra konstrukciju aprēķinus, jo mūra nestspēja tiek izmantota 50% robežās, līdz kurai mūri var uzskatīt par lineāri elastīgu materiālu.

Nosakot stiprības rādītājus visplašāk pielietotās ir daļēji sagraujošās testa metode, tādas kā Šmita virsmas cietības tests [16; 17], zondes penetrācijas tests [18], urbšanas [19], enkura griezes tests [20] un citi ir apskatīti dažādos izpētes darbos. Šo testu kalibrācija jāveic katrā vēsturiskā mūra tipā atkārtoti.

Lai novērtētu konstrukciju viendabību, sākotnēji attīstītas ultraskaņas, rentgena un radioloģijas tehnoloģijas. Mūsdienu skaneru attīstība mūra konstrukcijām galvenokārt balstīta uz radioviļņu radara skaneru tehnoloģijām. Mūra slēpto defektu noteikšanai izstrādātas metodes [21; 22; 23; 24], pielietojot ģeoradaru konstrukciju skanēšanai. Rīgas Doma baznīcas kolonu radarskanēšana parādīja, ka kolonu iekšienē sastopams pildbetons un „L” zonas kolonā [sk. 2.24. attēlu] neliela izmēra kaverna [8].

Analizējot [25; 26] mūra materiāla uzvedību vienass spiedes slogojumā datoraprēķinos ieviests homogēna materiāla modelis, kurā apvienojas mūra akmeņu un javas mijiedarbības efekti. Izmantojot šo materiālu īpašību definēšanas metodiku, laboratorisko atskaišu datus un Latvijas būvnormatīvu [27] noteiktos mūra materiālu elastības rādītāju korekcijas koeficientus, definētas homogenizēta mūra materiāla īpašības.

Mūra materiāla nelinearitāšu ievērtēšanai izmantota metodika [28], kura ievērtē plaisu ietekmi uz elastīgo īpašību izmaiņām. Makro modelēšanas tehnika [29], ir atzīta mūra analīzes pētījumos visā pasaulē un iekļauj mūra nelinearitātes efektus mūra šuvēs ar kompozīta interfeisa modeli. Šis modelis izskata trīs mūra plaknes vai konstrukcijas sabrukšanas mehānismus. Tie ir tīras stiepes sabrukums pa mūra šuvi, berzes spēku sabrukums pa šuvi no tangenciālajiem spriegumiem un eliptiskajiem normālspriegumiem, kā arī tangenciālo spriegumu kompleksā spriegumstāvokļa sabrukuma modelis.

Rīgas Doma baznīcas mūra materiālu īpašību izpēte [2] un zinātniskajos rakstos publicētās laboratorisko pētījumu atskaitēs devusi priekšstatu par homogenizēta mūra materiāla īpašībām. Testējot mūra paraugus no Rīgas Doma baznīcas karnīzes daļas iegūta robežstiprība spiedē: $R_{\min} = 4.2 \text{ MPa}$, $R_{\text{vid}} = 5.82 \text{ MPa}$ un $R_{\max} = 9.2 \text{ MPa}$. Veicot 7 ķieģeļu trīs punktu lieces testu [30], noteikta minimālā stiepes pretestība [31]. Apstrādājot laboratorisko pētījumu datus mūrim tiek pieņemti sekojoši parametri, kuri lietoti datorsimulācijā mūri definējot kā lineāri elastīgajā stadijā.

Sākotnējais elastības modulis	$E_0 = 3.6 \text{ GPa}$
Vidējais elastības modulis	$E_{\text{vid}} = 818 \text{ MPa}$
Junga modulis	$G = 1.2 \text{ GPa}$
Puasona koeficients	0.2
Termiskās izplešanās koeficients	$\alpha_t = 0.000005 \text{ 1/grāds}$
Akmens materiāla (ķieģeļa) spiedes stiprība	$R_1 = 4.5 \text{ MPa}$
Mūra javas spiedes stiprība	$R_2 = 2.5 \text{ MPa}$
Mūra spiedes pretestība	$R = 1.1 \text{ MPa}$
Mūra centriskās stiepes pretestība	$R_t = 0.05 \text{ MPa}$
Mūra cirpes pretestība pa gala šuvi	$R_{\text{sq}} = 0.11 \text{ MPa}$
Mūra stiepes pretestība liecē pa gala šuvi	$R_{\text{tb}} = 0.08 \text{ MPa}$
Mūra pretestība galvenajiem stiepes spriegumiem	$R_{\text{tw}} = 0.08 \text{ MPa}$
Rukuma efekta koeficients	$\nu = 2.2$
Mūra materiāla tilpumsvars	$\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$

Mūra homogenizētajam materiāla modelim, pēc Latvijas būvnormatīva metodikas un laboratoriskajos testos, iegūtie parametri apkopoti tabulā 1.

Modelējot temperatūras iedarbes, sniega slodzes un vēja slodzes būvkonstrukciju datoranalīzes programmā Staad Pro pielietots hibrīdelementu formulējums ar 3 mezglu plātnes elementiem. Šāds modeļa elementu formulējums ļauj ievērtēt plātnes lieces momenta un šķērsspēku radītu iekšējo spēku komponenti.

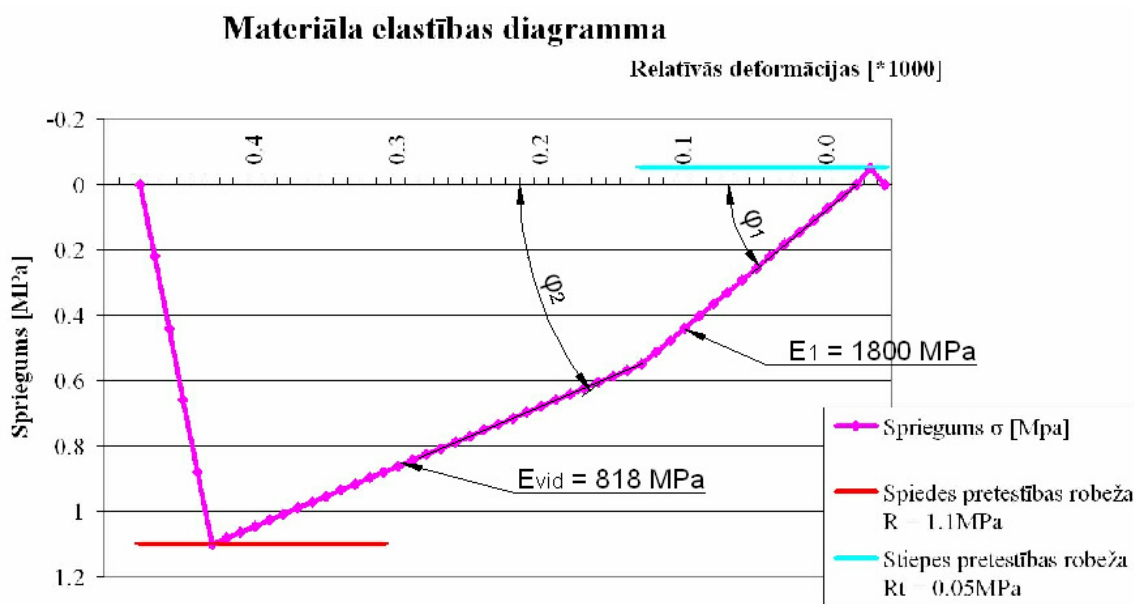
Plasticitātes ievērtēšana un sabrukuma teorijas mūra aprēķinos

Spiedes spēku izraisītu sabrukumu raksturo izkaisītu mikroplaisu attīstība un apvienošanās, kuru pavada progresīva bojājuma lokalizācija un makro plaisu veidošanās. Pirms sabrukuma robežstāvoklī, paraugā veidojas šķērsspēka radītas plaisas [18], kas izsauc sabrukumu. Mūra konstrukcijas sabrukšanas procesi [19] ievērtēti sabrukuma modelī. Spiedes spēks paraugā rada vertikālu plaisu pa ass līniju, veidojot parauga daļu savienojuma plakni.

Šobrīd izstrādātas vairākas mūra konstrukciju analīzes metodes, tādas kā galīgo elementu metode ar interfeisa elementiem, diskrēto elementu metode un režģu modeļi. Vienkārši slogotām simetriskām konstrukcijām vai iepriekš eksperimentāli testētām konstrukcijām, kurās plaisu dislokācija un attīstība ir iepriekš zināma, interfeisa elementus novieto gar plaisas attīstības ceļu. Pamatojoties uz [29] plaisājuma zonas analīzi, mūra datoranalīzes modelī, plaisājuma zonās tiek palielināts elementu skaits.

Kopš Cundall [32] izstrādāja diskreto elementu metodi, tā guvusi plašu pielietojumu un izraisījusi interesi pētnieku vidū [33], savu iespēju dēļ, aprakstot mūra konstrukcijas ar diskrētiem elementiem.

Analizējot literatūras avotu sniegtās informācijas, konstatēts, ka mūra šļūde atkarīga galvenokārt no iekšējo spriegumu līmeņa, temperatūras, mitruma un slogojuma cikliskās iedarbes. Zemākam sprieguma līmenim, līdz 50% no nestspējas, šļūdes efekts ievērtēts kā deformāciju daļa.



Att. 6. Mūra elastības diagramma ar mūra nestspējas robežstiprību stiepē un spiedē.

Modelējot mūra pārseguma sadalīšanās efektus, pielietota biezo plātņu teorija, izmantojot Mindlina - Reissnera formulējumu. Modelēšanai izmantota būvkonstrukciju datoraprēķina programma SAP 2000, izmantojot izoparametrisku plātnes elementu un homogenizēta mūra materiāla nelineāru raksturojumu, sk. 6. attēlu.

Pielietojot mūra materiāla homogenizācijas metodi nelineāros mūra aprēķinos mūra īpašības definētas atkarībā no spriegumstāvokļa šķērsgriezumā, sk. 6. attēlu. Aprakstot materiāla elastīgo īpašību nelinearitāti, materiāla modelī, ieviestas nestspējas robežas spiedē un stiepē.

Pildmūru vertikālo konstrukciju nestspējas robežas un sagrūšanas principi vēsturiskajām ēkām pētījis Binda [34], parādot ārējo slāņu izkļaušanos pieaugot slogojumam. Pildmūra pilastru pārslodze, zaru atšķirīgās deformācijas, vājā mūra slāņu sasaiste un dažādā ekspluatācijas ietekme uz slāņu materiāliem ir novedusi vēsturiskās ēkas līdz būtiskiem bojājumiem un pat sagrūvumam [35]. Kā galvenos pildmūru sabrukšanas cēloņus izceļot

pildījuma atšķirīgās īpašības, tā neiesaistīšanos kopējā mūra darbībā, apšuvuma mūrējuma šuvju izdrupumus un slāņu savstarpējo vertikālo sadalīšanos. Attīstot promocijas darbā izstrādāto esošu mūra ēku analīzes metodoloģiju, pildmūra gadījumā, materiāls jādefinē kā slāņu konstrukcija.

3. NODAĻA - KONSTRUKCIJAS ANALĪZE DEFORMĒTAJĀ STADIJĀ

Konstrukciju slogojums

Vēsturisko mūra ēku konstrukciju slogojums ir pamatu sēšanās, temperatūras iedarbe, sniega slodze, vēja slodze, dinamiskās iedarbes no apkārtējiem faktoriem un ekspluatācijas slodzes. Šajā darbā tiek izvirzīts pieņēmums, ka temperatūras iedarbe ir otrais nozīmīgākais mūra konstrukciju slogojums aiz pamatnes deformācijām.

Gotiska stila sakrālajās ēkās jumta konstrukciju balsti veidoti tieši uz vertikālajām konstrukcijām, tādēļ velvju pārseguma slogojumu sniega slodze neiespaido. Sniega slodzes efekts ir slodzes pieaugums vertikālajās konstrukcijās. Promocijas darba ietvaros analizētas sniega slogojums ietekme uz spriegumu izmaiņām konstrukcijās. Rīgas Doma baznīcas centrālā joma kolonu iekšējie spriegumi pie pilnas sniega slodzes sastāda 1,5% no kopējā vertikālā slogojuma, kas veido spriegumu palielinājumu kolonas šķēsgriezumā par 0,012 MPa. Sniega slodzes efekts ir vertikāli vērsts spiedes spēks kolonā, palielinot kolonas vertikālo noturību.

Vēja spiediena izraisītu horizontālu pārvietojumu maksimālās vērtības Rīgas Doma baznīcas karkasa šķērsvirzienā sastāda 14-17 mm, vidusjoma pārseguma centrālajā punktā. Vēja radītais spiedes sprieguma palielinājums kolonu malējās šķiedrās sasniedz 0,017 MPa, bet kontrforsu sienu malējās šķiedrās 0,002 MPa. Vēja slogojums rada ievērojamu sprieguma pieaugumu velvju pārsegumā, bet tā precīza analīze iespējama tikai reālās ģeometrijas modelī.

Katras sezonālās temperatūras izmaiņas noved pie jauna pārvietojuma, jo deformētajam starp bloku pārvietojumam ir tieksme saglabāt daļu no iepriekšējā temperatūras svārstību periodā iegūtā pārvietojuma. Kopš 2006. gada automātiskā monitoringa sistēmas ietvaros gan iekštelpās, gan nesošo sienu ārpusē notiek automātiski temperatūras mērījumi. Veicot ēkas monitoringa datu analīzi iegūta temperatūras difference ēkas iekšpusē, sastāda $\Delta t = +7.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ līdz $+20.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, bet ēkas ārpusē $\Delta t = -8.7$ līdz $+30.1$. No monitoringa sistēmas un manuāliem mūra virsmu temperatūras mērījumiem, klimatoloģiskā slogojuma [36] un būvnormatīvu metodikas [37] noteikts mūra konstrukcijas temperatūras slogojums. Šādas temperatūras svārstības noved pie iekšējās virsmas pagarinājuma temperatūras bloka apjomā par 0.3mm vasaras sezonā un pie ārējās sienas virsmas pagarināšanos par 2.3mm, pret augstākā gadalaika deformācijām. Kopējais sezonālais mūra termiskais pārvietojums ēkas garenvirzienā sastāda ~15mm. Maksimālās sprieguma izmaiņas velves čaulas malējās šķiedrās: $\Delta\sigma^{\circ} = 0.012\text{MPa}$.

Ekspluatācijas slodzes neiespaido ēkas velvju pārseguma. Baznīcu zvana radītās dinamiskās iedarbes [38] rada nozīmīgu slogojumu uz slaidām zvanu torņu konstrukcijām. Šī

darba ietvaros, velvju pārseguma konstrukcijas lietderīgais sloojums netiek ievērtēts mūra velvju pārseguma stiprības un noturības analīzē.

Mūra ēku ilgstošie būvniecības darbi nosaka pakāpenisku pašsvara pieaugumu un spriegumu pārdalīšanos jau būvniecības procesā. Vislielākos spriegumus mūra konstrukcijās izraisa mūra konstrukcijas pašsvars. Pašsvara izraisīti spriegumi vertikālajās mūra konstrukcijās sastāda 0,78 MPa, tādējādi sastādot 70% no mūra nestspējas spiedē un atrodas apgabalā, kurā nav nozīmīgu kaļķu javas plasticitātes efektu.

Rīgas Doma pārvaldes personāls saviem spēkiem vairāku gadu ilgā periodā veicis iekštelpu mikroklimata mērījumus. Mūra materiāla īpašības ir laikā mainīgas, tādēļ vēsturisko ēku būvkonstrukciju monitoringā liela uzmanība jāpievērš mūra degradācijai mitruma ietekmē. Materiāla homogenizētajā modelī, materiāla ilgstoša sloojuma efektu definēšanā pielietoti korekciju faktori [39], ievērtējot kaļķa javas šļūdi.

Plaisu monitorings

Pēdējos gados ar Rīgas Doma pārvaldes atbalstu un finansējumu savākta liela apjoma informācija par Rīgas Doma baznīcas ēkas ekspluatācijas vidi un būvkonstrukciju tehnisko stāvokli. Sniedzot informāciju masu saziņas līdzekļos, par apsekošanas etapu rezultātiem, ēkas stāvoklim pievērsta liela sabiedrības uzmanība.

Pamata un pamatnes izpētē norādīts un pamatnes slāņu ģeodinamiku, atskaitē [9] sniegta informācija par pamatnes elastības raksturlielumu samazināšanos un koka pāļu konstrukcijas degradāciju. Notiek pamatnes atšķirīgas deformācijas zem dažāda noslogojuma pamatiem, kurā galvenās deformāciju komponentes – bojātie koka pāļi un nesablīvēts smilšmāls, kas ir galvenais nevienmērīgu balstu deformācijas cēlonis. Plaisu monitoringa uzdevums ir sniegt informāciju, par plaisu atvēruma izmaiņām laikā, kas pastarpināti sniedz informāciju arī par pamatu deformācijām.

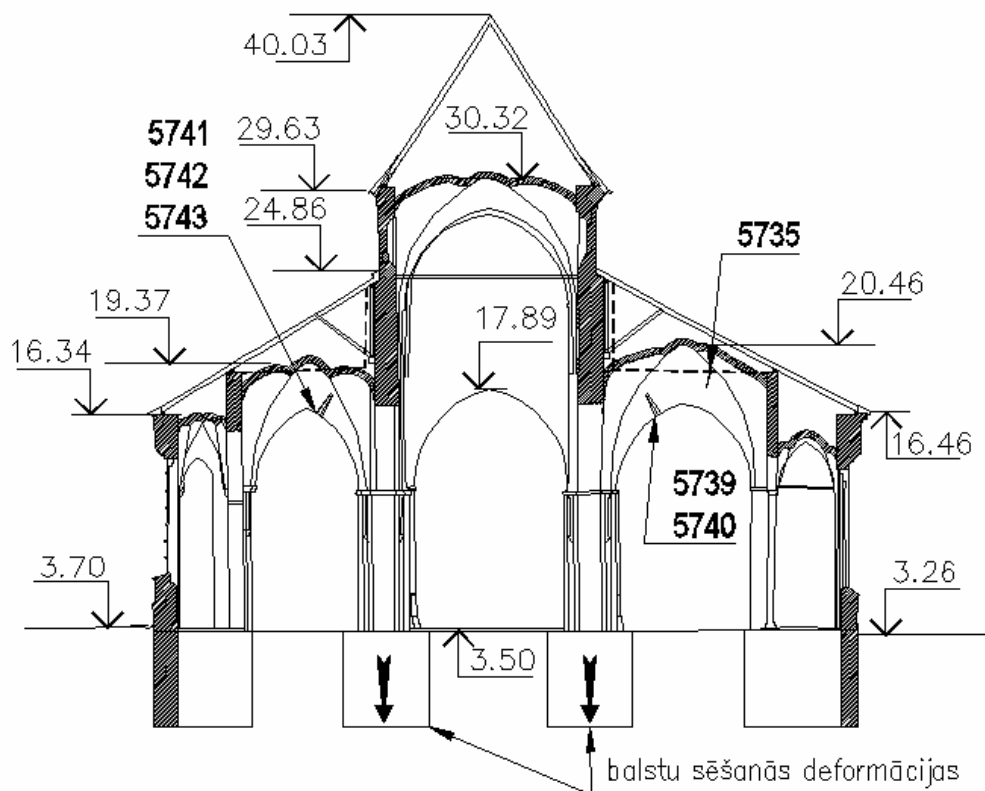
Promocijas darba metodoloģijas ietvaros piedāvāta kvalitatīvi augstvērtīgāka plaisu monitoringa sistēma, kas aizstātu tradicionāli lietotos noniusus un mehāniskos deformāciju mērītājus.

2005. gadā noslēdzot līgumu starp Rīgas Tehnisko universitāti un Rīgas Doma pārvaldi tika apsekoti mūra velvju redzami defekti un izstrādāta monitoringa programma. Sensoru ilgmūžība, ugunsdrošība un aizsargātība pret apkārtējās vides ietekmi izvirzīts kā principiāli svarīgs nosacījums monitoringa sistēmas tenzometra tipa izvēlē. Īpaša uzmanība pievērsta augstai mērījumu precizitātei un datorizēta datu nolasīšanas un kontroles iespējām. Iepriekš

minēto apstākļu dēļ tika izvēlēti Surveillance des Ouvrages par Fibres (SOFO) optisko šķiedru tenzometri.

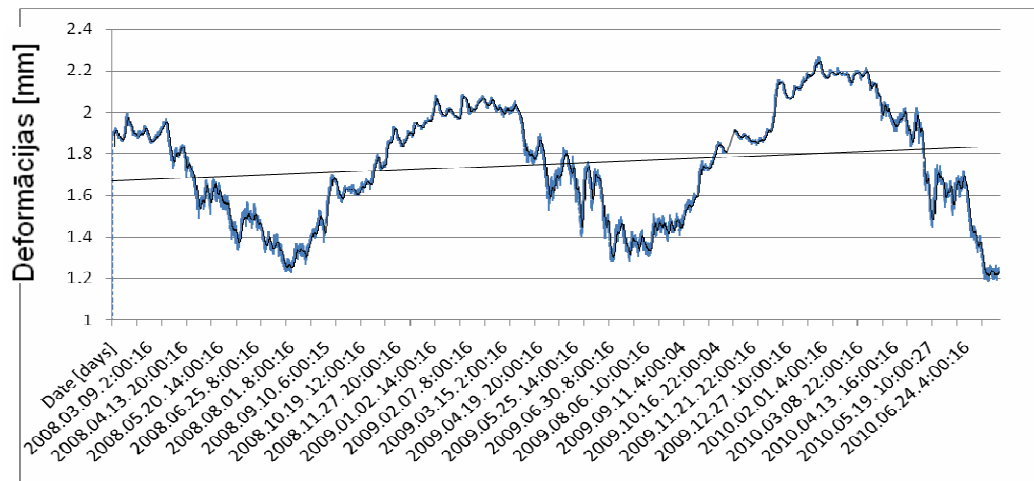
Monitoringa sistēma programmēta ar mērījumu intervālu 120minūtes, lai reģistrētu plaisu pārvietojumus dažādos diennakts posmos. Šāds skanēšanas biežums nodrošina monitoringa datu uzkrāšanas iespēju, iekārtas atmiņā, 70 dienu periodam.

SOFO optiskie tenzometri uzstādīti Rīgas Doma baznīcas velvēm no apakšas un no bēniņu puses. Šāda sensoru izvēle nodrošina pārvietojuma mērījumus $\pm 2,5\text{mm}$ robežās, mērot gan plaisas samazināšanos, gan paplašināšanos. Uz baznīcas velvju pārsegumiem un galvenajām arkām uzstādīti 22 optiskais tenzometri un 3 temperatūras sensori. 7. attēlā parādīts sensoru novietojums, lai kontrolētu arku plaisu atvēršanos, veidojoties locīklām abās pusēs plīsuma zonām.

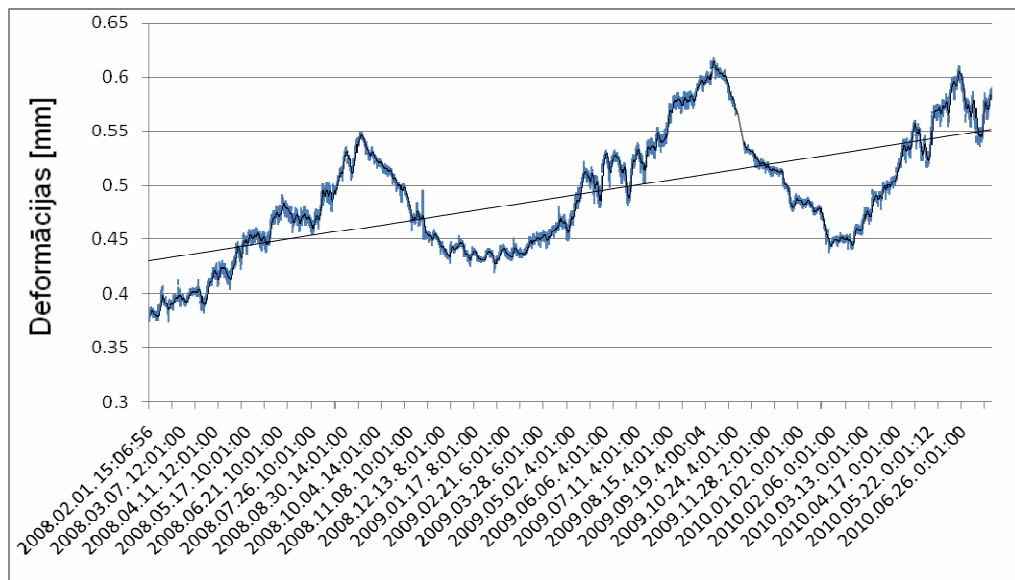


Att. 7. Tenzometru izvietojuma shēma griezumā.

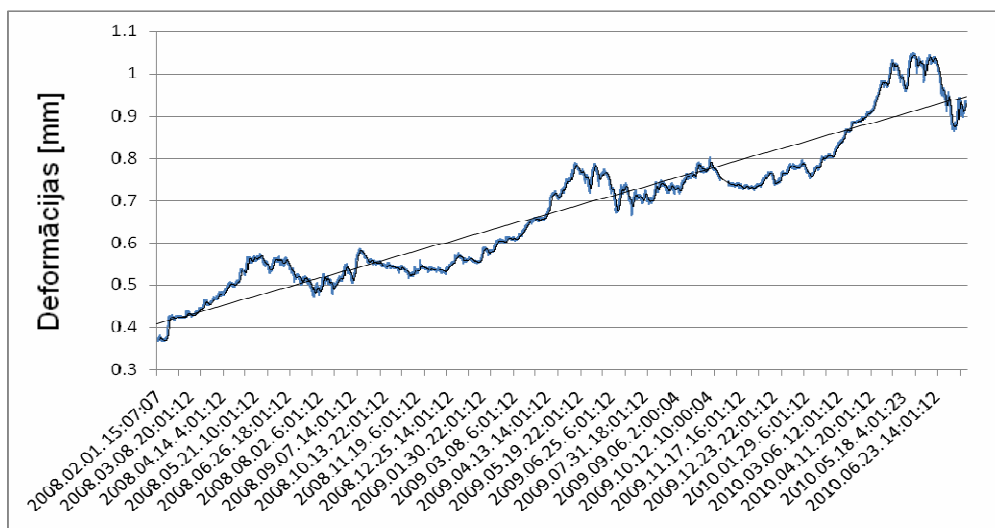
Sensoru nolasījumi pēdējo trīs gadu periodā parāda tendenciozu plaisu attīstību, sk. 8.; 9. un 10. attēlus. Optisko tenzometru mērījumi velves ribas virspusē (sensors 5735) un divi optiskie tenzometri (sensori 5739 un 5740), velves apakšpusē, kontrolē arkas mūra daļu locīklas mehānisma pārvietojumus.



Att.8. .Sensors 5735 – Novietots uz arkas ribas pa asi „2”, starp asīm „C” un „D”. Sensors novietots uz arkas ribas no augšpuses un norāda torņa dienvidu joma ārējā balsta pārvietojuma nevienmērību pret torņa mūra daļu. Tenzometrs parāda 4 locīklu mehānisma, augšējā locīklas ārējās malas pārvietojumus.

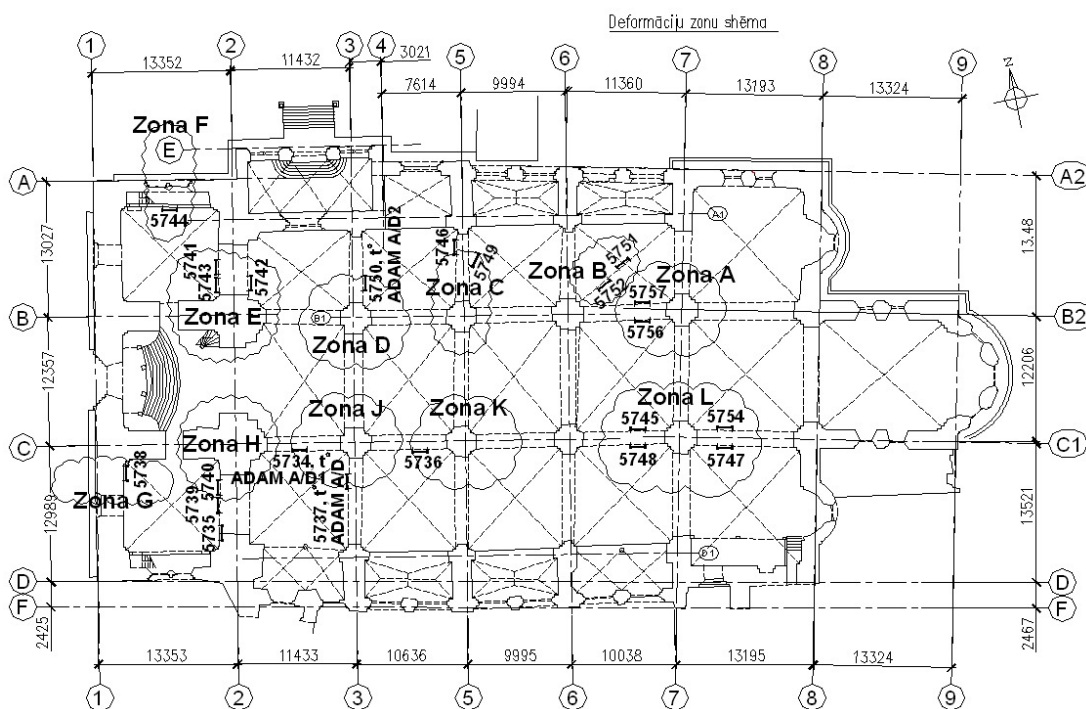


Att. 9. Sensors 5739 – Novietots uz arkas ribas pa asi „2”, starp asīm „C” un „D” no zāles puses uz arkas ribas apakšas. Plaša neparāda tiešu 4 locīklu arkas ribas apakšējā locīklas ārējās malas pārvietojumu, bet kopā ar sensoru 5740 rāda agrīno gadu rekonstrukcijā veikta ķīla iemūrējuma atdalīšanos no sākotnējās arkas ribas. Iemūrējuma ķīlis padara arkas ribu lēzenāku, bet plaša nenodrošina sākotnējās arkas un aizmūrējuma pilnu kopdarbību.



Att. 10. Sensors 5740 – Novietots uz arkas ribas pa asi „2”, starp asīm „C” un „D” no zāles puses uz arkas ribas apakšas. Plaisa neparāda tiešu 4 locīkļu arkas ribas apakšējā locīklas ārējās malas pārvietojumu, bet kopā ar sensoru 5739 rāda agrīno gadu rekonstrukcijā veikta ķīla iemūrējuma atdalīšanos no sākotnējās arkas ribas. Iemūrējuma ķīlis padara arkas ribu lēzenāku, bet plaista nenodrošina sākotnējās arkas un aizmūrējuma pilnu kopdarbību.

No plaisu monitoringa iegūta informācija par 11 atšķirīgu deformācijas zonu eksistenci Rīgas Doma baznīcā, sk. 11. attēlu.



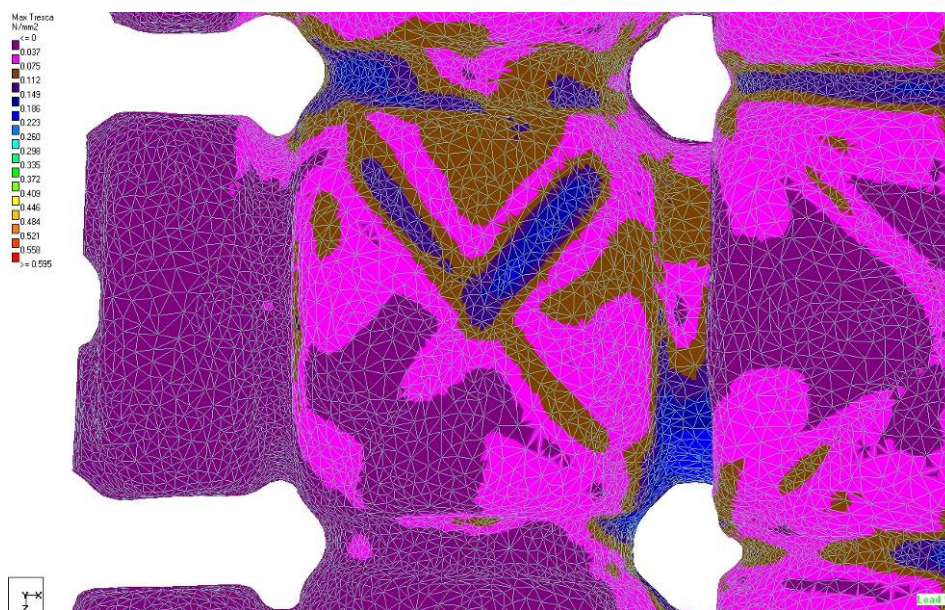
Att. 11. Rīgas Doma baznīcas pamatu deformāciju zonas un plaisu monitoringa sensoru novietojums.

Uzstādītā monitoringa sistēma nodrošina 11 locīklu mehānismu pārvietojumu kontroli, ļaujot analizēt mūru daļu pārvietojumus.

Velvju konstrukcijas lokāla sabrukuma modelēšana

Stiepes spriegumi veido šķērsriezuma laukuma vājinājumu, kuru diskrēta aprēķinu modeļa gadījumā pieņemts aprakstīt kā locīklu starp mūra daļām. Vairāk kā 3 locīklu veidošanās mūra velvī šķērsgriezumā noved pie mehānisma izveidošanās, kas draud ar velvī sabrukumu. Velvju pārsegumu ekspluatācijas drošības kritērijs ir tieši saistīts ar velvju daļu savstarpējiem pārvietojumiem. Nevienmērīga pamatu sēšanās atspoguļojas pārseguma velvju plaisu atvēruma izmaiņās, jo katra plaisa veido locīklu velvī ribā, tādējādi sakoncentrējot pārvietojumu. Locīklas veidošanās un mūra daļu savstarpējais kontakts [40] rada velvī ģeometrijas izmaiņas neproporcionāli rotācijas mehānisma ģeometrijai.

Sākotnējā ģeometriskā proporciju sistēmā, būvējot velvī, nodrošina spiedes spēka ass atrašanos šķērsriezuma kodola zonā. Modelējot atbalsta kolonas deformācijas, imitējot tās nevienmērīgu sēšanos, sk. 12. attēlu, mūra velvī čaulā un atbalsta ribās attīstās stiepes spriegumi. Analizējot balsta deformācijas definēta robeža, pie kuras iestāsies mūra sabrukums stiepes spriegumiem pārsniedzot mūra nestspēju stiepē.



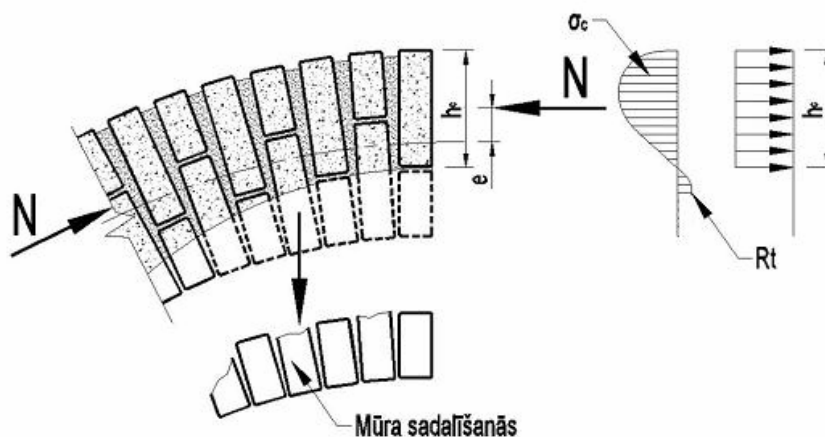
Att. 12. Mūra pārseguma velvē un balsta ribā veidojas būtisks stiepes spriegumu pieaugums.

Modelējot vidusjoma kolonu rindas nevienmērīgu sēšanās deformāciju attiecībā pret sānu jomu sienu pamatiem, iegūta balstu nevienmērīgas deformācijas linearitātes robeža 40 mm. Stiepes spriegumi sasniedz stiepes pretestību un velvī virsmā veidojas plaisa.

Turpmākas pamatu nevienmērīgās deformācijas veido plaisājuma zonu attīstību un mūru sadalīšanos. Balstu turpmākas deformācijas tiek kompensētas ar mūra daļu locīklas mehānisma rotāciju.

Promocijas darba ietvaros, pārseguma analīze lineāri elastīgajā stadijā, lietojot būvkonstrukciju datoranalīzes programmu Staad Pro, tiek izvirzīts par vienu no pirmā tuvinājuma aprēķina ceļiem. Veicot aprēķinus ar biezo plātņu izoparametriskiem trijstūru elementiem, izmantojot hibrīdelementu formulējumu [sk. promocijas darba 3.5 nodaļu], iespējams aptvert ievērojami lielāku ēkas daļu vai pat visu ēku kopumā. Šāda pieeja ļauj izvēlēties kritiskās zonas otrās pakāpes analīzei uz mūra konstrukcijas sadalīšanos. Plaisājuma zonu modelēšanai pielietota būvkonstrukciju datoraprēķinu programma SAP 2000, aprakstot homogenizētu mūra materiāla nelineārās īpašības un ieviešot materiāla sagrūšanas robežas, sk. 12. attēlu.

Lai atrastu spiedes spēka ass novietojumu šķērsgrīzumā tika radīta Microsoft Excel darba tabula, iekļaujot tajā pārbaudes pēc spēkā esošā būvnormatīva [27]. Izstrādātā tabula nodrošina šķēlumu pārbaudi uz iekšējiem spēkiem, pieļaujamajām ekscentritātēm un spiedes spēka ass novietojumu šķēlumā. Balstu deformāciju radītais lieces moments palielina stiepes spriegumus un noved pie lokāla šķērsgrīzuma sabrukuma, sk. 13. attēlu. Cikliska slogojuma ietekmē, šādā šķēlumā veidosies šuvju izdrupumi, ka var novest pie velves sadalīšanos.

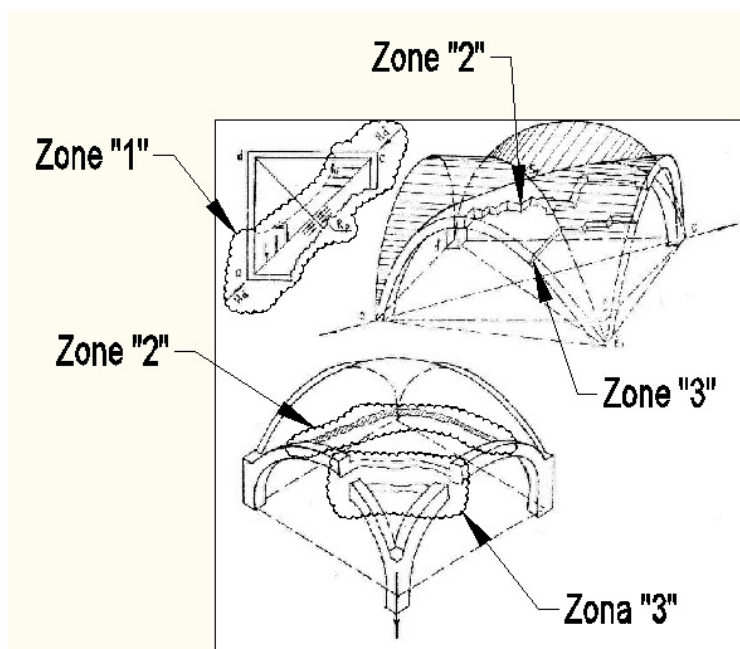


Att. 13. Šķērsgrīzuma sadalīšanās cikliska ekscentriskā slogojuma ietekmē izsauc velves mūra šuvju izdrupšanu un šķērsgrīzuma sadalīšanos

Analizējot balsta deformāciju radītu plaisājumu izdalītas 3 zonas, sk. 14. attēlu:

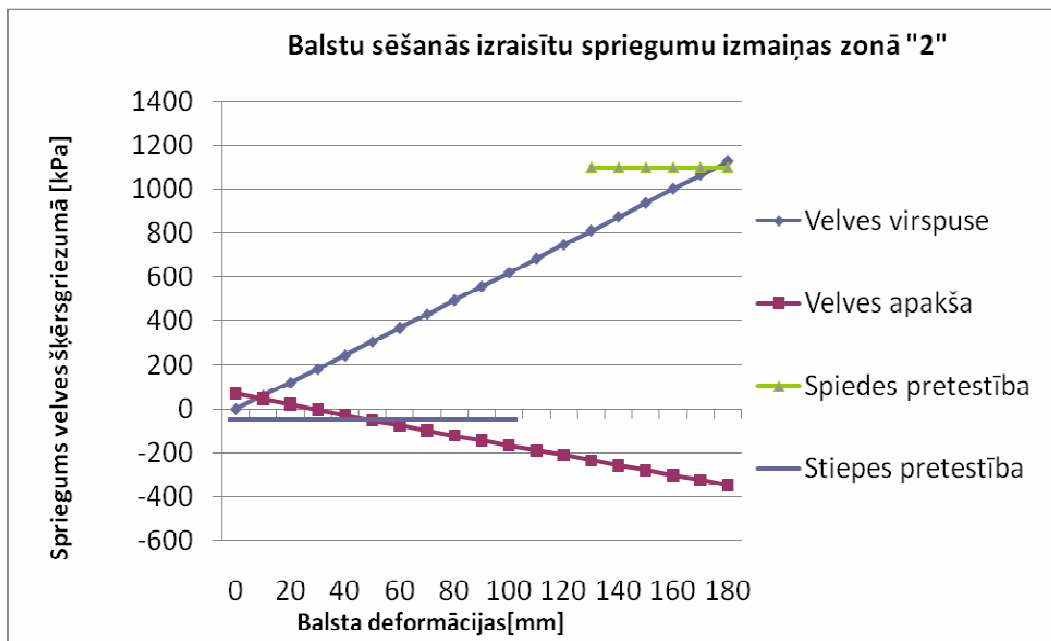
- a) Zona „1” – Deformējoties velves stūra balsta mezglam, samazinās asspēks pieguļošajā diagonālē un pieaug spriegumi perpendikulārajā velves diagonālē,

- b) Zona „2” – Deformējoties velves stūra balsta mežglam, veidojas rotācijas locīkla velves čaulas virspusē,
- c) Zona „3” – Deformējoties velves stūra balsta mežglam, veidojas rotācijas locīkla velves čaulas apakšpusē.

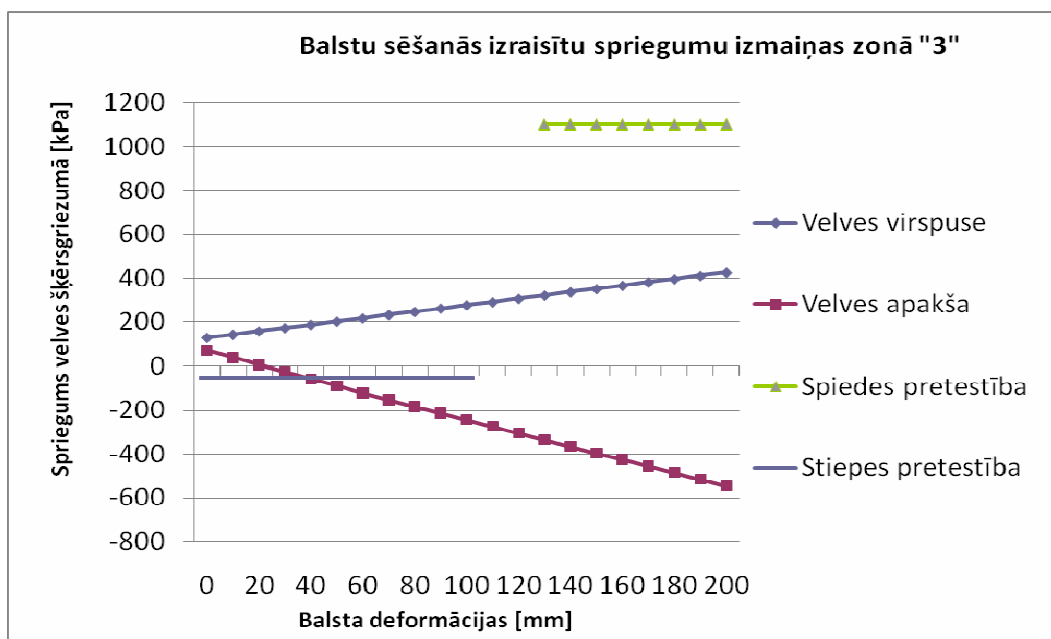


Att. 14. Locīklu zonu veidošanās balstu deformāciju ietekmē izraisa deformāciju zonu “2” un “3” veidošanos un spriegumu pārdalīšanos un pieaugumu ribas zonā “1”.

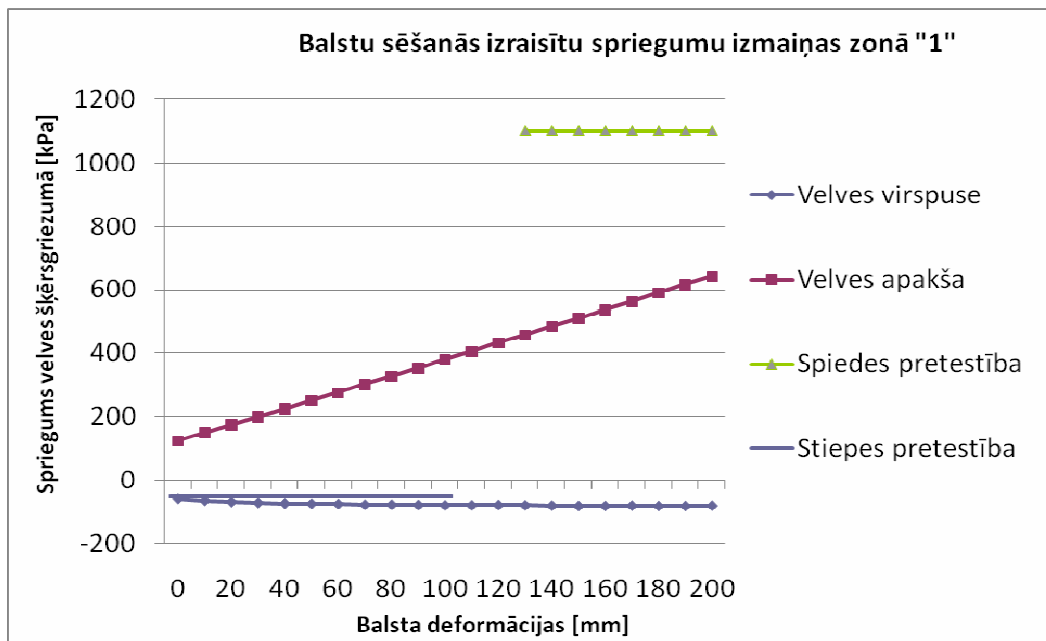
Modelējot balsta deformācijas iegūta lineāra sakarība līdz stiepes pretestības robežai velves čaulā, sk. 15., 16. un 17. attēlus. Deformējoties balstam zonās „2” un „3” attīstās stiepes spriegumi, veidojot iecirkņus, kuros mūra elementi var zaudēt noturību, sk. 3.10. attēlu.



Att. 15. Spriegumu izmaiņas zonā "2", deformējoties velvē balstam.



Att. 16. Spriegumu izmaiņas zonā "3", deformējoties velvē balstam.



Att. 17. Spriegumu izmaiņas zonā “1”, deformējoties velnes balstam.

Atslogojoties plaisājuma zonām „2” un „3”. Asspēks velnes čaulas konstrukcijā pārorientējas „1” zonas virzienā.

Veidojoties mūra blokam pie deformētā balsta - zona „3”, tā noturību nodrošina spēku līdzsvars. Šķēluma stiprības nosacījumi nodrošina konsoles daļas noturību, robežlīdzsvars šķēlumā aprakstīts vienādojumā 1. [41].

$$R_t * h_p * z \geq Q * a \quad (1)$$

kur: h_p – stieptās zonas augstums;

z – stieptās zonas kospēka un spiestās zonas kospēka, spēkpāra plecs;

Q – rotējošās mūra daļas pašsvara spēks;

a – rotējošās mūra daļas plecs pret apskatāmo šķēlumu.

Locīklas veidošanās un mūra daļu savstarpējais kontakts [42] rada velnes ģeometrijas izmaiņas neproporcionāli rotācijas mehānisma ģeometrijai. Mūra daļu kontakta vietā veidojas sagrūvums spiedes spriegumu iedarbībā, kas realizējas, kā mūra javas plasticitāte.

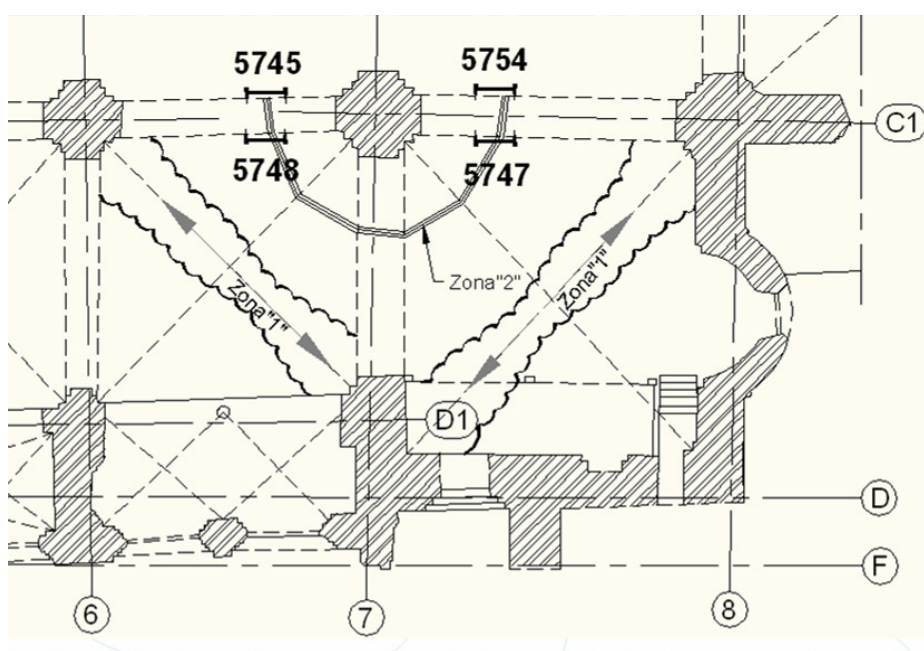
Globālas noturības modelēšana un progresīvās sabrukšanas novērtējums

Pēc Pētera baznīcas torņa sagrūšanas 1666. gadā tika pieņemts lēmums pastiprināt Rīgas Doma baznīcas torni. Tā laika pastiprinājuma kalumi saglabājušies līdz mūsu dienām. Katra baznīcas pārbūve maina iekšējo spēku sadalījumu konstrukcijās, tādējādi padarot apgrūtinātu visu mūra konstrukcijas analīzi kopumā. Pasaules praksē fiksēti gadījumi [43], kad balstu pārvietojumi izsaukuši velvju progresīvu sabrukumu.

Plasticitātes attīstīšanās kontaktaukumos locīklu šķērsgriezumos, ir galvenais pašsvara slogotu arku sabrukšanas iemesls, balsta pārmērīgu pārvietojumu rezultātā. Kinemātiskā, jeb mūra daļu rotācijas „mehānisma” metode tikusi attīstīta Heimana darbā [44] un ieviesta mūra arku aprēķinos. Heimana [45; 46] kinemātiskā sabrukuma metode ievērtē arkas sabrukuma mehānismu, tas ir četru locīklu veidošanās arkas konstrukcijā. No plasticitātes teorēmas izriet, ka spiedes ass līnijai pietuvojoties arkas ārējai plaknei četrās vietās, veidojas drošības kritērija pārsniegšana.

Nozīmīgs efekts ēku sabrukuma prognozēšanā ir materiālu īpašību testa datiem un to degradācijas ātruma novērtējumam. Šļūdes deformāciju uzkrāšanās ietekmē velvju pārseguma liekuma formas ģeometriju un konstruktīvā pacēluma samazināšanās noved pie nelineāra iekšējo spriegumu pieauguma, kuri pastiprina šļūdes efektus. Heimans [46] uzsvēris, ka plastiskā robežaprēķina metode var būt veiksmīgi pielietota pašsvara slogotām gravitācijas konstrukcijām, tādām, kā mūra tilti, arkas un velves.

Doma baznīcas deformāciju zonas „L” plaisu monitoringa dati norāda uz balsta ciklisku, pilnīgu, atbrīvošanos ziemas / vasaras sezonā.



Att. 18. Velvju balstbīdes pārvešana uz blakus konstrukcijām.

Balsta deformācijas zonā „L” izsauc velvju balstbīdes pārvešanu uz blakus kolonām un sienas daļu pa asi "7", sk. 18. attēlu.

Sensors 5745; 5747; 5748 un 5754 – novietots pie apjotas kolonas, asu „C” un „7” krustpunktā. Sensors uzstādīti no vidusjoma un bēniņu puses un dod pilnīgu plaisu izmaiņu ainu. No šo sensoru datiem aprēķinātas kolonas vertikālās deformācijas pret blakus mūru apjomiem. Sezonālais kolonas relatīvais pārvietojums pret pārējiem mūra apjomiem sastāda 0.57mm.

Analizējot aprēķina rezultātus izveidota automātiska sasaiste starp būvkonstrukciju datoraprēķina programmu un MS Excel darba tabulām, nodrošinot šķērsriezuma pārbaudes pēc pieļaujamajiem spriegumiem, rezultējošā spēka ekscentritāti, plaisu veidošanos, asspēka un šķērsspēka lielumu. Rezultātu apstrāde sniedz atskaiti par plaisu izplatību elementos. Veidojot balstu deformāciju analīzes uzdevumu būvkonstrukciju datoraprēķinu programmā SAP 2000 šie apgabali veidoti ar smalkāku galīgo elementu dalījumu, tādējādi nodrošinot plaisu izplatības analīzi, pielietojot nelineāras materiāla īpašības.

Mūra čaulu pārsegumu drošas ekspluatācijas kritērija izstrāde

Promocijas pētījumā konstatēts, ka balstu vertikālās deformācija rada divējāda veida sabrukšanas draudus:

- a) Velves šķērsriezuma sagrūvumu cikliska, ekscentriskā slogojuma ietekmē, kas veidojas paralēli velves čaulas virsmai, tuvu neitrālās ass plaknei,
- b) Velves mūra apgabalu noturības zudumus rotējot mūra elementam.

Mūra šķērsriezuma sadalīšanās saistīta ar šuves materiāla izdrupumiem, šis efekts promocijas darba ietvaros nav analizēts. Velvju izdrupuma draudi novērtējami ar tradicionālajām mūra apsekošanas metodēm. Rīgas Doma baznīcas deformāciju zonā „B” raksturīgs šis sagrūvuma tips. Sagrūvuma attīstību jāanalizē ar lokālu mūra šuvju kontroli un ķieģeļu noturību. Šāds sagrūvuma veids nedraud ar lielu baznīcas konstrukciju apjoma progresīvu sagrūvumu.

Otrajā sabrukuma veidā drošības analīze veikta ar promocijas darbā aprobēto metodi. Locīklas šķēlumā, spriegumiem mūra materiālā sasniedzot šļūdes robežu, tiek sasniegta materiāla un formas ģeometriskās linearitātes robeža. Turpmāka locīklas šķēluma atvēruma palielināšanās un cikliskas svārstības rada paliekošu velves daļu ģeometrijas pārvietojumu [47].

Velves pārseguma ekspluatācijas drošība atkarīga no deformāciju apmēriem [29], iedalot tos dažādu virzienu balstu deformācijās. Ar datoranalīzi prognozēta drošas ekspluatācijas robeža velves mūra daļu rotācijas ietekmē. Modelējot Rīgas Doma baznīcas

balsta deformācijas iegūtas drošas ekspluatācijas robežas, plaisu pārvietojumus un velvju ģeometriju attiecinot pret balstu deformācijām.

Mūra pārsegumu sadalīšanās un bloku sasaistes zudums modelēts ar datorprogrammas palīdzību. Iesaistot GEM datorprogrammas SAP 2000 nelineāro moduli modelēta plaisu attīstība balstu deformāciju ietekmē. Balstu deformāciju radītie iekšējie spēki un plaisājuma zonas salīdzinātas ar Rīgas Doma baznīcas plaisu monitoringa datiem.

Velvju pārseguma zonas "H" drošas ekspluatācijas robeža definēta pie velvju ribu noturības zuduma - 1/24 daļas laiduma, ievērtējot: balstu deformācijas un plaisu monitoringa rezultātus. Velvju ribu rotācijas punktu ģeometriskais novietojums nosaka pārvietojumus velves čaulā. Saglabājoties lineārām balstu deformācijas tendencēm, 0.18mm/gadā, noturības zudums velves čaulas zonās "2" un "3" tiek prognozēts pēc 95 gadiem.

Attīstot promocijas darbā piedāvāto metodoloģiju, jāpievieno metodes tādu faktoru ietekmes ievērtēšanai, kā:

- a) mitruma migrācijas ietekme uz materiāla īpašību pasliktināšanos;
- b) javas saistvielu degradācija turpmākās ekspluatācijas laikā;
- c) karbonizācija māla ķieģeļos ekspluatācijas laikā;
- d) mūra rukuma attīstība turpmākās ekspluatācijas laikā;
- e) mūra tehnoloģijas ietekme uz iekšējo spriegumu sadalījumu;
- f) rekonstrukciju izraisīta iekšējo spriegumu pārdalīšanās
un citi mazākas nozīmes efekti.

SECINĀJUMI

Promocijas darbā izvirzītie mērķi un uzdevumi ir sasniegti. Pētījums sniedz noslēgtu metodoloģiju vēsturiska arhitektūras mantojuma konstrukciju tehniskā stāvokļa analīzei, saglabāšanai un ekspluatācijas drošības novērtējumam.

Promocijas darba ietvaros izstrādāta metodoloģija vēsturisku ēku mūra velvju pārseguma aprēķiniem, pielietojot inversās inženierijas principus un aprobējot tos būvkonstrukciju analīzei.

1. Secināts, ka mūra velvju virsmu lāzerskanēšana, salīdzinājumā ar tradicionālo mūra konstrukciju uzmērīšanu, sniedz laiktelpības ieguvumu 50-80%, ievērtējot virsmas plakņu ģeometrisku sarežģītību.
2. Secināts, ka pretstatā industriālajai inversajai inženierijai, mūra virsmu plakņu formēšana nav pilnībā automatizējama un datu apstrādi jāveic manuāli, kas sastāda 70% apjoma no kopējās darbietilpības.
3. Piedāvāts datu transformāciju formāts *.dxf (Drawing Interchange Format), datu apmaiņai starp modelēšanas un analīzes datorprogrammām, tādējādi metodiku attiecinot uz plašu būvkonstrukciju datoranalīzes instrumentu klāstu un samazinot transformējamās informācijas apjomu.
4. Minimizējot aprēķina rezultātu kļūdu iegūta pieļaujamā modeļa novirze no reālās konstrukcijas virsmas ģeometrijas, vienlaicīgi izvērtējot modeļa elementu ģeometrisku izmēru un modeļa elementu skaitliskā izmēra ietekmi. Rīgas Doma baznīcas mūra velvju pārseguma gadījumā, noteikta optimāla modeļa virsmas novirze, zem 14.3mm.
5. Esoša mūra materiālam konstatēta būtiska nestspējas raksturlielumu izkliede. Mūra materiālu izpētei izvēlētas negraujošas vai minimāli sagraujošas testa metodes, respektējot vēsturisko arhitektūras pieminekļu saglabāšanas prasības.
6. Mūra javas stiprības robežas noteikšanai piedāvāts lietot PNT-G urbšanas penetrācijas enerģijas testu, kura īpaši precīzus rezultātus dod zemas stiprības mūra javām.
7. Kā tiešu mērījumu, augstas precizitātes, esoša mūra homogenizēta materiāla elastības raksturlielumu noteikšanas metodi, piedāvāts lietot dubulto plakanā domkrata testu.
8. Piedāvāts, homogenizēta mūra materiāla deformāciju – spriegumu diagrammu aprakstīt ar lineāriem iecirkņiem, iekļaujot sabrukšanas kritēriju stiepē un spiedē.
9. Piedāvāts, homogenizēta materiāla modelī, materiāla stiprības raksturlielumus definēt kā minimālos no plakniska sprieguma stāvokļa diagrammas, lai ievērtētu mūra kārtu orientāciju pret tīkla modeļa elementu orientāciju.

10. Mūra masīviem ieteikts izmantot radioradara skanēšanu, lai noteiktu viendabību un materiāla homogenizēta raksturojuma pielietojšanas iespējas analizējamajai konstrukcijai.

Izstrādāta metodoloģija, kuras metožu secīga izpilde sniedz esošu mūra ēku pārseguma konstrukciju drošības analīzi. Analizējot plaisu monitoringa datus, prognozēta reālas konstrukcijas aktīvāko deformācijas zonu drošas ekspluatācijas robeža.

11. Pašsvara slogotas mūra konstrukcijas projektētas ievērojot ēku ģeometrisku proporciju principu, tādējādi nodrošinot spiedes spēka dislokāciju šķēsgriezuma centra zonā. Noteikts, ka Rīgas Doma baznīcas velvju pārseguma pamatu nevienmērīgām deformācijām pārsniedzot 40mm, tiek pārsniegts velvju čaulas stiprības robežstāvoklis.
12. Analizējot globāla sabrukuma draudu pieaugumu, no kopdarbības izslēdzoties velves balsta mezglam, noteikts iekšējo spēku relokācijas mehānisms, pārnesot slogojumu uz blakus balstiem.
13. Noteikts, ka vēja slodze rada spriegumus ēkas perimetra sienu malējās šķiedrās, kas sastāda 1.5% no spriegumiem mūra masīvā. Šos spriegumus, pilnā mērā, nevar attiecināt uz velvju pārseguma čaulas konstrukciju, un vēja slogojuma efekts tiek pieņemts par maznozīmīgu un netiek ievērtēts velvju ekspluatācijas drošības analīzē.
14. Analīzes rezultātā konstatēts, ka temperatūras slogojums velvju šķēsgriezumā sezonāli maina spriegumu pieaugumu un samazinājumu $\pm 1.5\%$ robežās, no pašsvara radītā sprieguma. Pārvietojums temperatūras bloka ietvaros atspoguļojas plaisu atvēruma izmaiņās, velves ribās, mūra masīvam pagriežoties kontakta locīklā.
15. Secināts, ka balstu nevienmērīgas sēšanās deformācijas, mijiedarbībā ar temperatūras slogojuma radītiem plaisu pārvietojumiem, nodrošina sezonālas velvju pārseguma stāvokļa izmaiņas un ir noteicošās velvju drošas ekspluatācijas robežas novērtēšanā.
16. Deformāciju zonās konstatētās plaisu atvēruma svārstības, kuras analizējot reālās ģeometrijas modeli, pārnests uz nevienmērīgām balstu deformācijām. Konstatēts, ka locīklu mehānisma pārvietojumi velvju ribās nosaka transformētus plaisu pārvietojumus velves čaulā, kas atkarīgi no reālās velves ģeometrijas.
17. Parādīta mūra velves čaulu drošas ekspluatācijas robeža atkarība no čaulas balstu pārvietojumiem, kas izriet, kā daļa no velves ģeometriskajiem izmēriem. Analizējot dinamiskāko Rīgas Doma baznīcas deformāciju zonu „H” iegūta drošas ekspluatācijas robeža 95 gadi.

LITERATŪRA

1. Fitchen J. The Construction of Gothic Cathedrals. – Lielbritānija, Londona: The University of Chicago Press, Ltd., 1961. - 344 lpp.
2. Meirovics S., Šveics A. Rīgas Doma baznīca. Sienu, ailu, plaisu izpēte un monitorings. - Rīga. RTU Nesagraujošo testēšanas metožu laboratorija, 2005. – 131 lpp.
3. Rībenis A., Galviņš J. Dzintarnieks M., Doma baznīca. Mūrjavu ķīmiskā izpēte. - Rīga. V/U „Restaurācijas institūts”, 1990. - 12 lpp.
4. Pelīte U., Lešinskis A. Vēsturisko publisko ēku mikroklimata nodrošināšanas sistēmu optimizācija// RTU 46.Starptautiskā zinātniskā konference, 2005. gada 13.-15. oktobris. Rakstu krājums - RTU Zinātniskie raksti, sērija 2, sējums 6 - Arhitektūra un būvzinātne. Rīga. 2005. - 194.-202.lpp.
5. Kalinka M., Rutkovska E. Use the 3D laser scanning for documentation the Riga cathedral in Latvia// ISPRS Working Group v/4 Virtual reality and Computer Animation, ISPRS WG V/2 Cultural Heritage Documentation 2007. ETH Šveice, Cīrihe: - Konferences rakstu krājums – CD. 2007. – 5 lpp.
6. Kaļinka M. 2D lāzerskeneru izmantošana dokumentēšanā Rīgas Doma baznīcā un datu apkopošana datubāzēs// RTU zinātniskie raksti. 11.sēr., Ģeomātika. – 2.sēj. 2007. 95.-102.lpp.
7. Aumelis P., Meierovics S., Ķipēns D. Rīgas Doma baznīca. Velvju pārseguma izpēte. - Rīga. SIA „LBS Konsultants”. 2005. – 23 lpp.
8. Kovalenko F., Rīgas Doma baznīcas priekšaltāra telpas un priekšējo balsta kolonnu (S-3 un S-4) radioradarā zondēšana; Būvpamatnes ģeotehniskā izpēte. - Rīga. SIA "Balt-Ost-Geo". 2004. – 39 lpp.
9. Meirovics S., Celmiņš V., Buks I., Markvarts V. Rīgas Doma baznīca. Būves pamatojuma tehniskā izpēte. - // Rīga. SIA „LBS Konsultants”. 2005. – 147 lpp.
10. Trevits J. Rīgas Doma pamatu un pamatnes inženiertehniskā izpēte. - Rīga. SIA „LBS Konsultants”. 2007. – 70 lpp.
11. Kovalenko F. Gruntsūdens līmeņa monitorings Rīgas Domā un tā tuvākajā apkārtnē. Informatīvais pārskats par 2009. gada monitoringa darbiem. - Rīga. SIA "Balt-Ost-Geo". 2009. – 52 lpp.
12. Kovalenko F. Mikrobioloģiskās un bakteriālās darbības intensitātes gruntsūdens vidē Rīgas Doma pamatu zonā. - Rīga. SIA "Balt-Ost-Geo". 2006. – 64 lpp.

13. Kaļinka M. Rīgas Doma baznīcas Deformācijas marku novērojumi. - Rīga. RTU BF Ģeomātikas katedra. 2009. – 7 lpp.
14. Bondars K., Korjamins A. Rīgas Doma baznīcas velvju plaisu atvēruma monitorings. - Rīga. RTU BF Būvmateriālu un būvkonstrukciju katedra. 2010. - 30 lpp.
15. Kaļinka M., Štrauhmanis J. Rīgas Tehniskās Universitātes Būvzinātnes nozares Promocijas padomē// RTU zinātniskie raksti. 11. sēr., Ģeomātika. - 5. sēj. 2009. - 93.-96.lpp.
16. Michael S., Nondestructive testing and damage assessment of masonry structures// Progress in Structural Engineering and Materials. Sēj. 5. Nr. 4., 2003. – 239.-251. lpp.
17. Doebley C.E., Spitzer D.S. Guidelines and Standards for Testing Historic Mortars// Standards for Preservation and Rehabilitation, ASTM Special Technical Publication 1258, ASTM, ASV, Minesota, Ann Arbor. 1996. - 285.-293. lpp.
18. Felicetti R., Gattesco N. A Penetration test to Study the Mechanical Response of Mortar in Ancient Masonry Buildings// Materials and Structures, Francija, Parīze: 1998. Nr. 31. – 350.-356.lpp.
19. de Vekey R.C., Sassu M. Comparison on Non-destructive In-situ Mechanical Tests on Masonry Mortars: The PNT-G Method and the Helix Method// 11th International Brick/Block Masonry Conference. Tongji University. Ķīna, Šanhaja: - Konferences rakstu krājums, Sēj. 1. 1997. – 376.-384.lpp.
20. Ventura P., Sorrentino L. A new in situ torsional test to assess masonry mortar shear strength. Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica IX Jornadas, 2005. gada 16. – 19. novembris. Čīle, Concepción: - Konferences rakstu krājums – CD, 2005.
21. Bernabini M., Brizzolari E., Orlandi L., Santellani, G. Application of Ground penetrating radar on Colosseum pillars// 5th International Conference on GPR. Kanāda, Ontario, Kitchenera: - Konferences rakstu krājums. 1994. – 547.-558.lpp.
22. Binda L., Lenzi G., Saisi A. NDT of masonry structures: use of radar test for the characterisation of stone masonries// 7th International Conference on Structural Faults and Repair. 1997. gada 7. jūlijs. Skotija, Edinburga: - Konferences rakstu krājums, Sēj. 3. 1997. – 505.-514.lpp.
23. Binda L., Lenzi G., Saisi A. Radar Investigation for Diagnosis of Historic Buildings: Application to Stone Masonries// 8th International Conference on Structural Faults and Repair. Lielbritānija, Londona: - Konferences rakstu krājums – CD, 1999.

24. Cardarelli E., de Nardis R. Seismic refraction, isotropic anisotropic seismic tomography on an ancient monument (Antonino and Faustina temple ad 141)// Geophysical Prospecting, 2001. Sēj. 49., Nr. 2. – 228.-240.lpp.
25. Brencich A., Gambarotta L. 2005. Mechanical response of solid clay brickwork under eccentric loading. Part I: Un-Reinforced Masonry, Part II: CFRP-Reinforced Masonry, Materials and Structures - RILEM, 2005. Sēj. 38. Nr. 2. - 257–266.lpp.
26. Roman H., Gomes I. Numerical modelling of blockwork prisms tested in compression using the finite element method with interface behaviour// 13th International Brick and Block Masonry Conference. Nīderlande, Amsterdama: - Konferences rakstu krājums, Sēj. 2., 2004. – 421.-429.lpp.
27. Latvijas būvnormatīvs, LBN 205 – 97 Mūra un stiegrota mūra konstrukciju projektēšanas normas. – Rīga, SIA „Celtne S”, 1998. - 69 lpp.
28. Rots J.G. Numerical simulation of cracking in structural masonry// Heron, 1991. Sēj. 36. Nr. 2. – 49.-63.lpp.
29. Lourenco P.B., Rots, J.G. A multi-surface interface model for the analysis of masonry structures// Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Sēj. 1997. Nr. 7. - 660-668.lpp.
30. Latvijas Valsts standarts, LVS EN 1052-1:2000 Mūra testa metodes - 1.daļa: Spiedes stiprības noteikšana, LVS 2000.
31. Bondars K., Korjamins A., 2007. Influence of deformation at a heritage building support on stability of groined masonry arch// Computational Civil Engineering 2007, 5th International Symposium, 2007. gada 25. Maijs, Rumānija, Iași: - Konferences rakstu krājums, 2007. – 39.-54.lpp.
32. Cundall P.A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems// ISRM Symposium, Francija, Nancy: - Konferences rakstu krājums, Sēj. 2. 1971. – 129.-136.lpp.
33. Lemos J.V. Modelling the behaviour of a stone masonry arch structure under cyclic loads// 5th International Symposium on Computer Methods in Structural Masonry., Itālija, Roma: - Konferences rakstu krājums, 2001. – 101.-108.lpp.
34. Binda L., Modena C., Baronio G., Abbaneo S. Repair and investigation techniques for stone masonry walls// Construction and Building Materials, 1997. Sēj. 11., Nr. 3. – 133.-142.lpp.
35. Binda L., Anzani A., Mirabella Roberti G. The failure of ancient Towers: problems for their safety assessment// Int. IABSE Conference on “Composite Construction -

- Conventional and Innovative”, Ārihe, Šveice: - Konferences rakstu krājums, 1997. – 699.-704.lpp.
36. Latvijas būvnormatīvs, LBN 003 – 01, 2001. “Būvklimatoloģija”, MK 23.08.2001. not. Nr.376
 37. СНиП 2.01.07 - 85*, 1985. “НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ”, Госстрой СССР от 29 августа 1985 г. № 135.
 38. Beconcini M.L., Bennati S., Salvatore W. Structural characterisation of a medieval bell-tower: first historical, experimental and numerical investigations// III International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, University of Minho, 2001. gada 7.–9. novembris, Guimarães, Portugāle: - Konferences rakstu krājums, 2001. – 431.-444.lpp.
 39. Vonk R.A., A micromechanical investigation of softening of concrete loaded in compression// Heron, 1993. Sēj. 38., Nr.3. - 1-94.lpp.
 40. Chen Y., Ashour A.F., Garrity S.W. Modified four-hinge mechanism analysis for masonry arches strengthened with near-surface reinforcement// Engineering Structures. - 2007 Sēj. 29. Nr. 8. - 1864.-1871.lpp.
 41. Исследование деформаций, расчет несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем. Методические рекомендации. – Москва: Объединение «Союзреставрация», 1989. – 91 lpp.
 42. Heyman J. The safety of masonry arches// International Journal of Mechanical Sciences, Sēj.11., Nr.4., 1969. - 363.-385.lpp.
 43. Binda L., Baronio G., Gavarini C., De Benedictis R., Tringali S. Investigation on Materials and Structures for the Reconstruction of the Partially Collapsed Cathedral of Noto (Sicily)// 6° Int. Conf. Structural Studies, Repairs and Maintenance of Historical Buildings, STREMAH 99, Drēzdene, Vācija: - Konferences rakstu krājums, 1999. – 323.-332.lpp.
 44. Heyman J. The equilibrium of shell structures. – Oxforda, Lielbritānija: Clarendon Press, 1997. – 142 lpp.
 45. Heyman J. The masonry arch. – Lielbritānija: Ellis Horwood Limited, 1982. – 118 lpp.
 46. Heyman J. The stone skeleton. - Lielbritānija: Cambridge University Press, 1995. – 160 lpp.
 47. Korjakins A., Bondars K. Definition the safe exploitation limits of groin vault in heritage masonry structures// International conference on civil engineering design and

construction "Eurocodes - science and practice". 2010. gada 9.-11. septembris. - Bulgārija, Varna: - Konferences rakstu krājums, 2010. - 327.-332.lpp.

48. Huerta S. The Debate about the Structural Behaviour of Gothic Vaults: From Viollet-le-Duc to Heyman// Third International Congress on Construction History, 2009. gada 20.-24. Maijs. – Vācija, Cottbus: Chair of Construction History and Historical Preservation of the Brandenburg University of Technology, 2009. – 837.-844.lpp.